

Увеличение экономической эффективности ГТУ

за счет внедрения системы охлаждения воздуха испарительного типа

В. И. Быличкин, Т. Д. Разумова – ООО «Пауэр Инжиниринг Технолоджиз»

Сезонное кардинальное изменение климата в российских регионах ведет к ограничениям установленной мощности энергетического оборудования в рамках ОРЭМ, значительному увеличению расхода топлива, снижению эффективности использования ГТУ на рынке электроэнергии. В связи с этим наиболее актуальной задачей энергетической отрасли в России является техническое перевооружение существующего оборудования с одновременной его модернизацией, а также ввод новых генерирующих мощностей с использованием передовых технологий производства энергии.

In brief

Increasing of the economic efficiency of gas turbine power plant due to the introduction of evaporative type air cooling system.

The article presents the analysis of the influence of the main parameters of outdoor air on the characteristics of gas turbine power plant. The method of increasing the efficiency and cost-effectiveness of gas turbine plant operation by cooling the air at the inlet to the axial compressor in the context of one day is considered. The basic principles of air cooling are presented. The overview of the evaporative type cyclic air cooling system is given, its advantages and disadvantages are highlighted. The method of calculation of the considered air cooling system is presented. The analysis of the increase in the efficiency of gas turbine plant during the period of high outdoor temperatures is carried out.

The analysis of the influence of the evaporative type cooling system of the gas turbine plant was carried out on the basis of the pro-

В статье приведено исследование по повышению технико-экономических показателей парогазового генерирующего оборудования. Одним из существующих способов повышения эффективности ГТУ является применение различных систем охлаждения воздуха на месте всасывания комплексной воздухоочистительной установки (КВОУ). Проанализировано, как влияют основные параметры наружного воздуха на характеристики энергетических ГТУ. Рассмотрен способ повышения эффективности и экономичности работы установки с помощью охлаждения воздуха на входе в осевой компрессор в течение одного дня, выделены основные принципы охлаждения воздуха. Приведен обзор системы охлаждения циклового воздуха испарительного типа, определены ее преимущества и недостатки. Дана методика расчета рассматриваемой системы охлаждения воздуха, проведен анализ повышения экономичности ГТУ в период стояния высоких температур наружного воздуха.

Уникальность развития энергетики России, как отрасли, связана с ее географическим положением. Значительное разнообразие климатических условий на территории РФ позволяет достигать высоких экономических показателей при применении систем охлаждения воздуха на месте всасывания КВОУ ГТУ. Однако для каждого отдельного региона требуется детальный анализ перспективы реализации таких проектов.

Анализ влияния системы охлаждения испарительного типа на основные эксплуатационные показатели ГТУ проведен на базе рассматриваемого к реализации проекта. За основу взят блок ПГУ с газовой турбиной SGT5-2000E (Siemens Energy).

В отличие от паросиловых установок, работа энергетической ГТУ существенно зависит от параметров наружного воздуха, таких как давление, влагосодержание и температура. Колебания давления наружного воздуха на действующих установках наблюдаются в сильно ограниченных пределах, что незначительно влияет на работу ГТУ. Еще меньшее влияние оказывает влагосодержание рабочего тела.

Наиболее сильно влияет на работу установки изменение температуры наружного воздуха. Снижение температуры атмосферного воздуха увеличивает его плотность, массовый расход воздуха через компрессор, электрическую мощность ГТУ и электрический КПД установки [1, 2]. На рис. 1 показано изменение относительной мощности в зависимости от температуры наружного воздуха для турбины SGT5-2000E.

Рис. 1. Зависимость относительной мощности ГТУ от температуры наружного воздуха

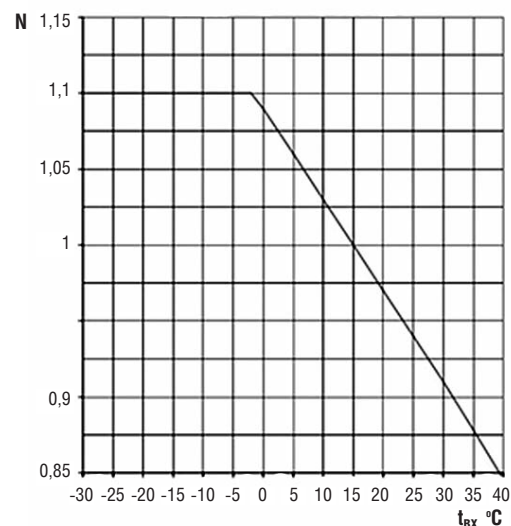


Табл. 1. Влияние температуры наружного воздуха на располагаемую мощность ГТУ

Температура наружного воздуха, °С	Располагаемая мощность, МВт
15	157,0
20	152,5
25	148,0
30	143,5

Для наглядности рассмотрим пример в цифрах. В табл. 1 показано, как повышение температуры воздуха на входе в компрессор с 15 °С до 30 °С приводит к снижению мощности ГТУ на 8,6 % – со 157 МВт до 143,5 МВт для SGT5-2000E.

Мощность ГТУ соответствует номинальному значению при стандартных внешних условиях: температуре наружного воздуха 15 °С, барометрическому давлению 101,325 кПа и относительной влажности 60 % [3]. Диспетчерский график электрических нагрузок составляется исходя из аттестованной (установленной) мощности ГТУ, полученной при стандартных условиях. Повышение температуры воздуха приводит к снижению мощности ГТУ ниже установленного значения, что в свою очередь ведет к сокращению маржинальной прибыли от продажи электроэнергии и мощности.

Наиболее актуальна данная проблема для блоков ПГУ, работающих по договорам предоставления мощности (ДПМ). С учетом стояния высоких температур наружного воздуха в течение 3–5 месяцев экономические потери от сокращенного производства электроэнергии с высоким удельным расходом топлива оказываются весьма значительными. Кроме того, дополнительные экономические потери возникают при превышении числа постоянных ограничений, значения которых были переданы системному оператору заблаговременно. В этом случае подаются заявки на дополнительное снижение мощности с различными коэффициентами.

Существует несколько способов стабилизации располагаемой мощности ГТУ, один из них – повышение начальной температуры газов. Но данный способ не является целесообразным, так как из-за увеличения температуры газов снижается ресурс дорогостоящих лопаток. Также способом повышения эффективности ГТУ является снижение внутренней мощности компрессора. В зимний период эксплуатации при низких значениях температуры атмосферного воздуха снижается его расход на единицу мощности ГТУ и, следовательно, потребляемая компрессором мощ-

ность. Таким образом, снижение температуры забираемого из атмосферы воздуха позволяет повысить электрическую мощность и электрический КПД установки.

Относительно простое решение, не требующее кардинальных конструктивных изменений КВОУ, – разместить во входном канале воздухозаборного устройства испарительный охладитель или теплообменные поверхности специального холодильного агрегата. Мощность энергоблока можно повысить на 5...10 %, используя преимущества системы охлаждения воздуха [4]. Охлаждение воздуха на входе в ГТУ широко применяется для повышения КПД и мощности энергоблоков, прежде всего, в странах с жарким климатом.

Одним из способов охлаждения циклового воздуха является охлаждение при испарении. В его основе лежит физическое явление

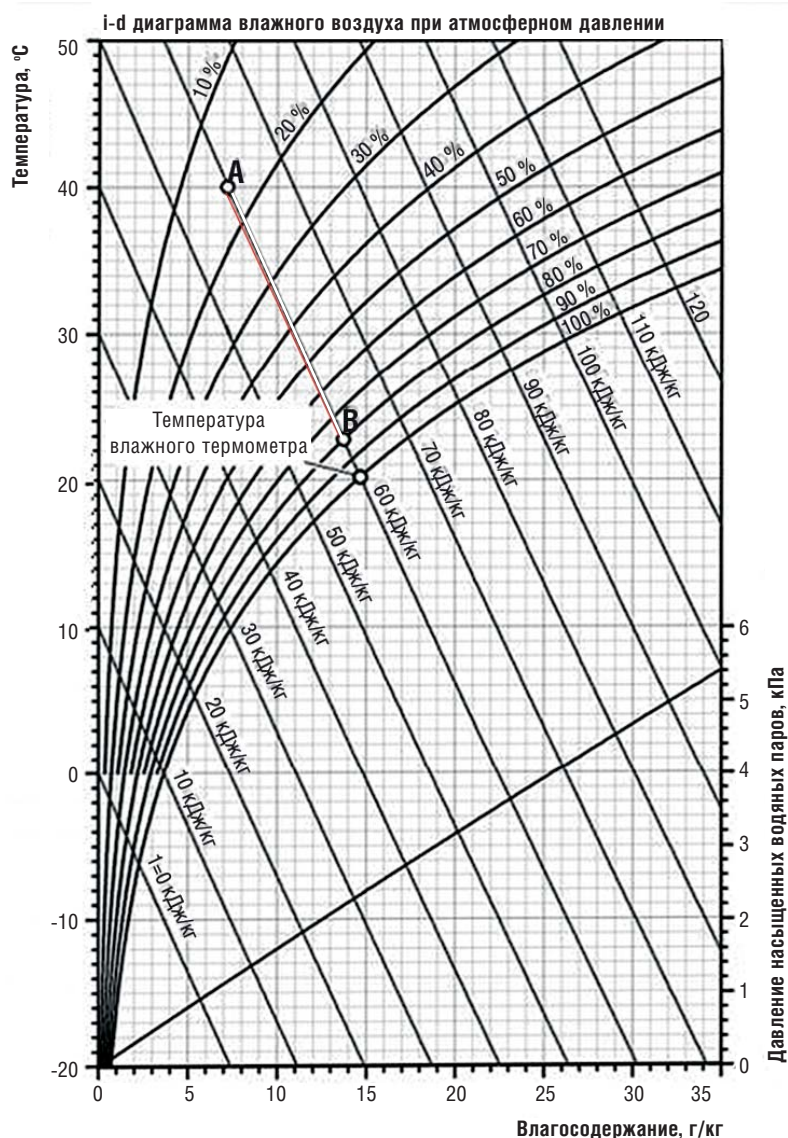


Рис. 2. Процесс охлаждения воздуха при испарении

охлаждения воздуха за счет испарения капель воды. Испарение жидкости происходит за счет скрытой теплоты, необходимое количество которой берется из окружающей среды. При испарении воды влажный термометр сравнивается с сухим, полученное значение соответствует потенциалу охлаждения при испарении. Чем больше разница двух температур, тем выше эффект охлаждения. Охлаждение при испарении приводит к увеличению влагосодержания и относительной влажности воздуха соответственно (рис. 2).

Температура воздуха после системы охлаждения рассчитывается согласно формуле

$$T_B = T_A - CE \cdot (T_A - T_{\text{влаж}}), \quad (1)$$

где

T_A – температура сухого термометра перед системой охлаждения;

T_B – температура воздуха после системы охлаждения;

$T_{\text{влаж}}$ – температура влажного термометра;

CE – эффективность насыщения (КПД испарителя).

Принципиальная схема системы охлаждения испарительного типа приведена на рис. 3. Объем воды непрерывно подается насосом низкого давления в распределительный коллектор системы испарительного охлаждения, и она равномерно стекает по пористому материалу. Воздух, проходя через смоченный материал, насыщается влагой до 97...98 %, охлаждается и направляется на вход компрессора ГТУ. Часть воды, которая не испарилась, поступает в нижний коллектор, откуда возвращается в аккумулирующий бак. Предусматривается линия подпитки и дренаж для поддержания качества воды на заданном уровне. Подача воды автоматически прекращается при температуре воздуха ниже 12 °С.

Рис. 3. Принципиальная схема системы охлаждения испарительного типа

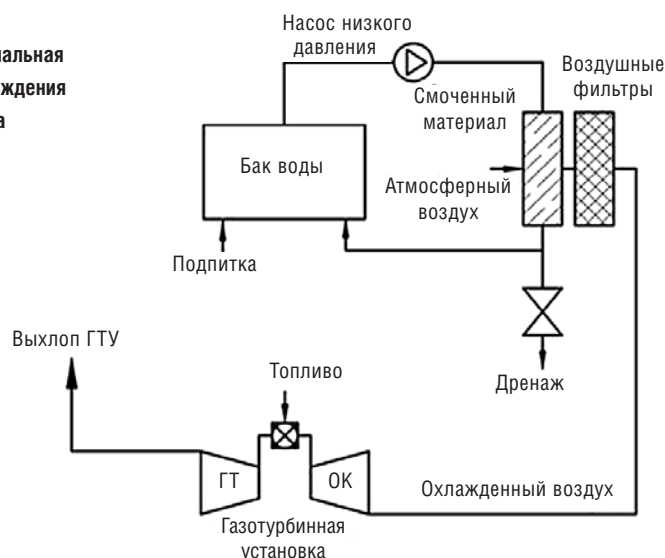


Табл. 2. Основные показатели качества подпиточной воды

Показатель	Уровень	
	min	max
Электропроводимость общая, мкСм/см	50	750
Жесткость (CaCO ₃), ррт (мг/дм ³)	45	170
Щелочность общая, ррт (мг/дм ³)	45	170
pH	7	8,5

Существующие в настоящее время системы охлаждения испарительного типа позволяют использовать воду для подпитки относительно низкого качества (техническая / сырая / водопроводная). В табл. 2 представлены показатели качества подпиточной воды.

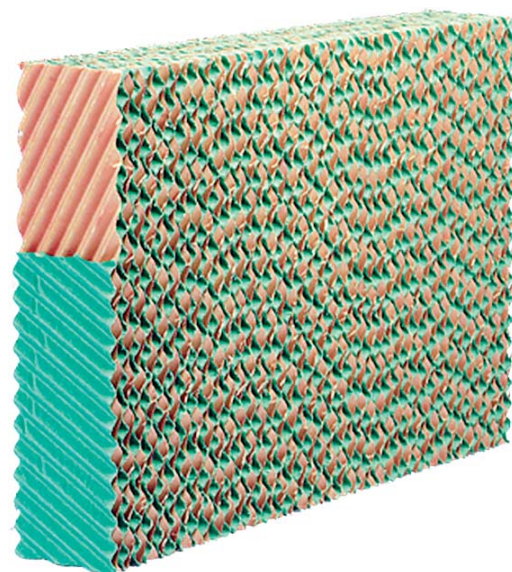


Рис. 4. Пористый материал

Испарительный охладитель, как правило, проектируется на эффективность насыщения не менее 88 %, для чего толщина пористого материала должна составлять порядка 300 мм. Материал на основе пропитанных бумажных волокон (рис. 4) устанавливается в сечении воздушного канала КВОУ ГТУ до системы фильтрации. Это значительно сокращает пылевую нагрузку на первую ступень фильтрации и продлевает ресурс работы фильтров. За испарительным материалом можно установить сепаратор капель, однако при скорости воздуха менее 2,5 м/с и размещении системы охлаждения перед фильтрами в этом нет необходимости. Также между материалом и каплеотделителем может находиться площадка обслуживания шириной 700...800 мм. Таким образом, ширина всего модуля системы охлаждения не превысит 1500 мм.

Аккумулирующий бак может располагаться как в цехе, так и под открытым небом, на нулевой отметке по отношению к установке. Стоит

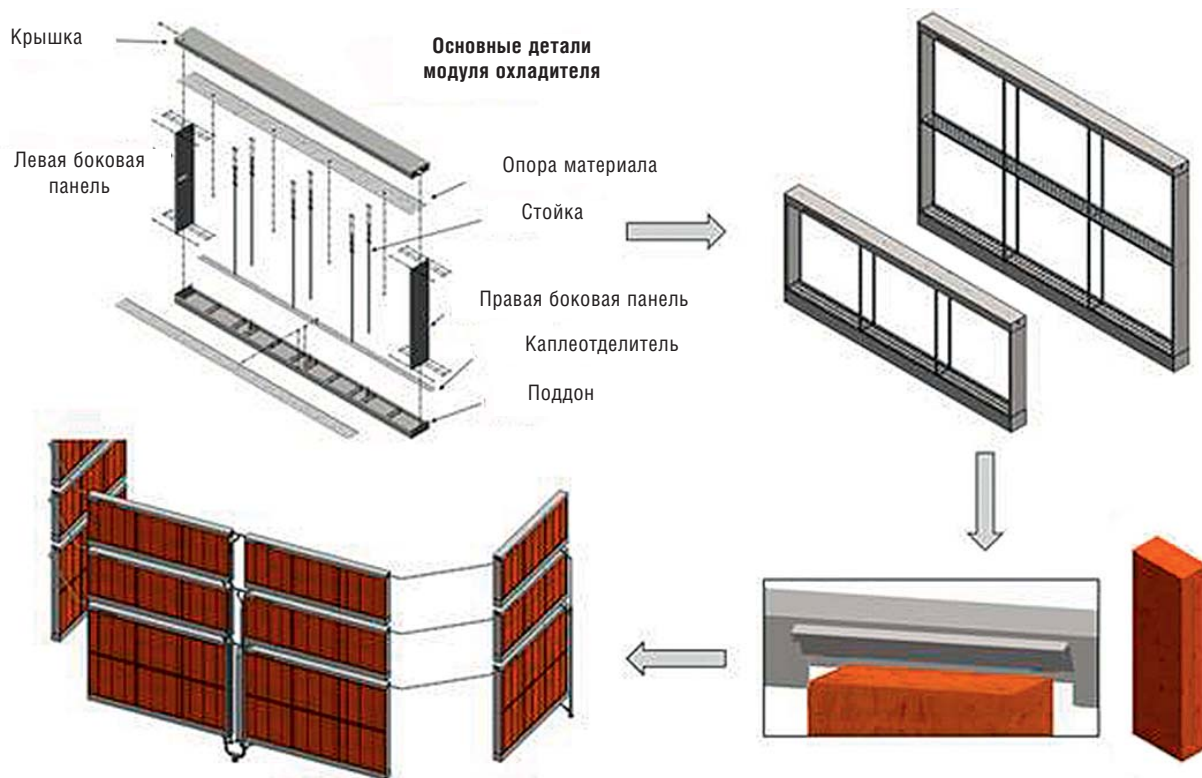


Рис. 5. Комплект испарительного охладителя

Табл. 3. Преимущества и недостатки системы охлаждения испарительного типа

Преимущества	Недостатки
- Низкие капитальные затраты - Низкие затраты на ремонт и обслуживание - Быстрый монтаж - Возможность работы на воде низкого качества - Дополнительная ступень фильтрации - Отсутствие негативного влияния на проточную часть ГТУ	- Ограниченная глубина охлаждения - Дополнительный перепад на входе в КВОУ (~140 Па)

Табл. 4. Изменение параметров наружного воздуха в течение одного дня

Показатель	08.07.2020 15:00
Температура воздуха (без ИУ), °C	33
Влажность воздуха (без ИУ), %	32
Температура воздуха (с ИУ), °C	21,8
Влажность воздуха (с ИУ), %	89,4
Увеличение мощности ГТУ, МВт	17,47
Значение плановых ограничений (без ИУ), МВт	3,345
Значение плановых ограничений (с ИУ), МВт	0,0
Снижение плановых ограничений, МВт	3,345
Значение оперативных ограничений Δ2.2 (без ИУ), МВт	9,1
Значение оперативных ограничений Δ2.2 (с ИУ), МВт	0,0
Снижение оперативных ограничений Δ2.2, МВт	9,1

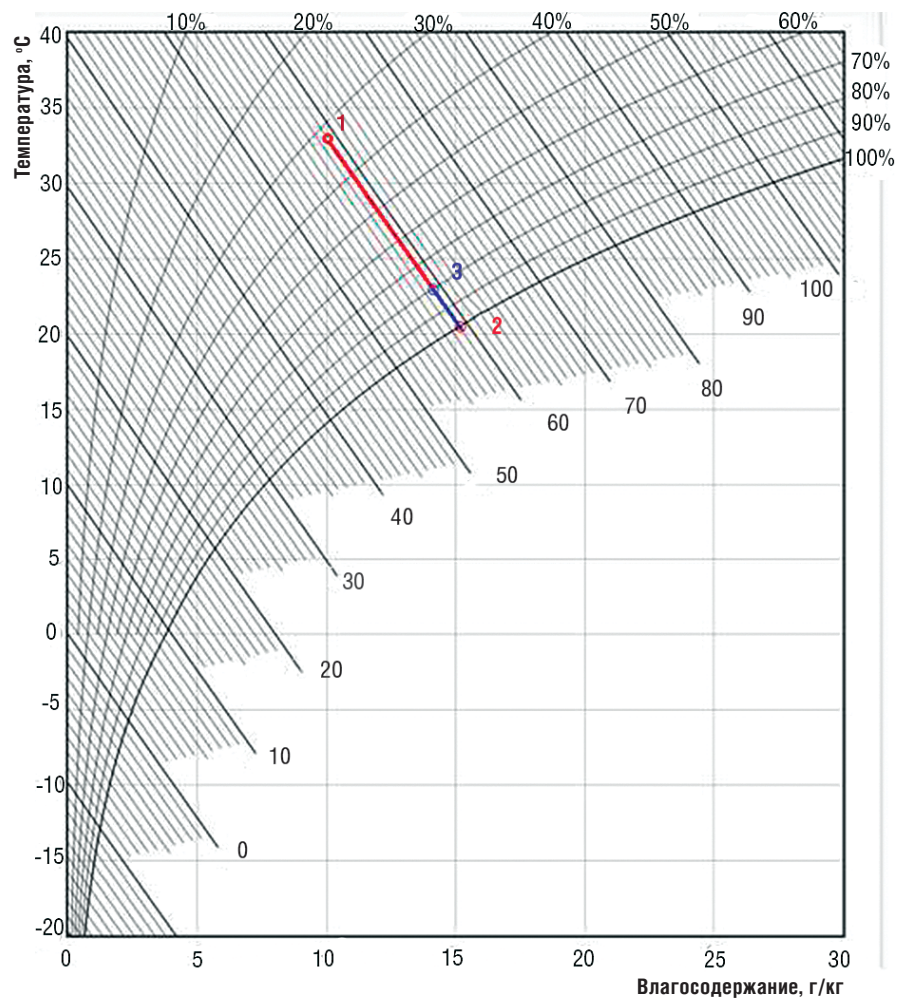


Рис. 6. Диаграмма Моля

Табл. 5. Изменение параметров наружного воздуха в период стояния высоких температур

Показатель	май	июнь	июль	август	сентябрь
Средняя температура воздуха (без ИУ), °C	11,23	17,44	18,84	16,38	12,93
Средняя влажность воздуха (без ИУ), %	66,99	66,54	73,93	73,41	68,15
Средняя температура воздуха (с ИУ), °C	9,25	14,02	15,86	13,63	10,68
Средняя влажность воздуха (с ИУ), %	83,08	92,74	96,28	95,33	87,14
Среднее увеличение мощности ГТУ, МВт	0,40	1,55	2,51	2,37	0,53
Среднее значение плановых ограничений (без ИУ), МВт	3,345	3,345	3,345	3,345	3,345
Среднее значение плановых ограничений (с ИУ), МВт	3,331	2,241	1,633	1,450	3,350
Снижение плановых ограничений, МВт	0,023	1,113	1,721	1,904	0,004
Среднее значение оперативных ограничений $\Delta 2.2$ (без ИУ), МВт	1,529	0,059	0,186	0,000	2,039
Среднее значение оперативных ограничений $\Delta 2.2$ (с ИУ), МВт	1,155	0,000	0,062	0,000	1,531
Снижение оперативных ограничений $\Delta 2.2$, МВт	0,374	0,059	0,124	0,000	0,508

отметить, что испарительный материал создаст дополнительные потери давления на месте всасывания КВОУ ГТУ (120...140 Па при номинальной нагрузке), что приведет к снижению мощности на 0,10...0,15 % [5]. На осенне-зимний период материал может быть демонтирован для снижения перепада на входе в КВОУ.

Этапы сборки испарительной установки (ИУ) показаны на рис. 5. Сборка и монтаж охладителя осуществляются в короткие сроки в период плановых остановов ГТУ. Сначала собирается рама охладителя из нержавеющей стали, которая монтируется в существующую конструкцию КВОУ. Сам испарительный материал устанавливается внутрь рамы, как показано на рис. 5. В табл. 3 приведены основные преимущества и недостатки системы охлаждения испарительного типа.

Согласно законам термодинамики [6] для влажного воздуха, с учетом характеристик оборудования и на основании архивных данных системы автоматического управления (САУ) ПГУ, моделируются процессы охлаждения для каждого мгновенного значения параметра. Моделирование позволяет определить значения температуры и влажности воздуха после испарительной установки, а также рассчитать увеличение мощности ПГУ и снижение заявленных ограничений установленной мощности.

В качестве примера расчета рассмотрим точку 08.07.2020 года в 15:00 (табл. 4). Параметры атмосферного воздуха в рассматриваемой точке: температура 33 °C, относительная влажность 32 %, атмосферное давление 98,258 кПа. Установленная мощность ГТУ –173 МВт. На основании исходных данных и с помощью поправочных коэффициентов на температуру, давление и влажность рассчитывается располагаемая фактическая мощность ГТУ при данных условиях.

Далее с помощью диаграммы Мольте (рис. 6) и по имеющимся исходным данным (температура, давление и влажность воздуха) определяется энтальпия и влагосодержание воздуха перед ИУ (точка 1). Поскольку испарительное охлаждение является адиабатическим, то энтальпия воздуха не изменяется. Согласно этому находим температуру мокрого термометра (точка 2 – 22 °C и 100 % влажности).

Поскольку испарительный охладитель имеет свой КПД, который меньше 100 %, то он не может охладить воздух до температуры мокрого термометра (до точки 2). Температура после охладителя (точка 3) определяется по формуле (1). Учитывая дополнительное сопротивление, которое дает охладитель, а также исходя из температуры и влажности воздуха после системы охлаждения, рассчитывается располагаемая мощность ГТУ. После

Табл. 6. Результаты расчета за один день

Параметр	С ИУ	Без ИУ
Дата	08.07.2020	
Атмосферное давление, кПа	98,375	98,375
Температура воздуха на всасывании КВОУ, °C	19,3	26,1
Влажность воздуха на всасывании КВОУ, %	93,5	53,4
Установленная мощность, МВт	173	
Располагаемая мощность, МВт	143,7	121,43
Плановые ограничения (факт), МВт	0,0	3,4
Дополнительные ограничения фактические ($\Delta 2.2_{\text{факт}}$), МВт	0,0	3,6
Всего ограничений, МВт	0,0	7,0
Увеличение мощности, МВт	-	8,96
Цена продажи электроэнергии на РСВ, р./МВт·ч	1 344,47	
Суммарная выручка за продажу дополнительной электроэнергии, р.	-	12 046,45
При работе ГТУ по ДПМ		
Стоимость мощности, р./МВт·день	37 847,44	37 847,44
Суммарная выручка за продажу дополнительной мощности, р.	-	275 150,88
Общая выручка за продажу электроэнергии на РСВ и дополнительной мощности, р.	-	287 197,33
При работе ГТУ по программе КОМ		
Стоимость мощности, р./МВт·день	9 677,42	9 677,42
Суммарная выручка за продажу дополнительной мощности, р.	-	70 354,84
Общая выручка за продажу электроэнергии на РСВ и дополнительной мощности, р.	-	82 401,29

определения располагаемой мощности с включенной системой охлаждения, рассчитываются ограничения, которые будет нести ГТУ.

Согласно представленной методике, рассчитывается изменение основных параметров наружного воздуха, увеличение мощности газотурбинной установки и снижение ограничений мощности за счет уменьшения температуры воздуха на месте всасывания КВОУ при использовании системы охлаждения испарительного типа. В *табл. 4* приведены результаты расчета в конкретный момент времени, а в *табл. 5* среднемесячные показатели работы в летний период времени.

График изменения температуры и влажности воздуха на месте всасывания КВОУ в течение одного дня (08.07.2020) показан на *рис. 7*, график снижения суммарных ограничений и изменения мощности – на *рис. 8*. В *табл. 6* приведены усредненные результаты расчетов за один день.

Выводы

1. Внедрение технологий, снижающих температуру воздуха на входе в компрессор, позволяет повысить эффективность работы газотурбинной установки.

2. Система охлаждения испарительного типа – относительно простое и дешевое решение для увеличения располагаемой мощности ГТУ в период высоких температур, которое позволяет увеличить прибыль от продажи электроэнергии и мощности.

3. Комплекс работ (проектирование, поставка, строительные-монтажные и пусконаладочные работы) по внедрению системы охлаждения испарительного типа может быть выполнен в срок менее одного года.

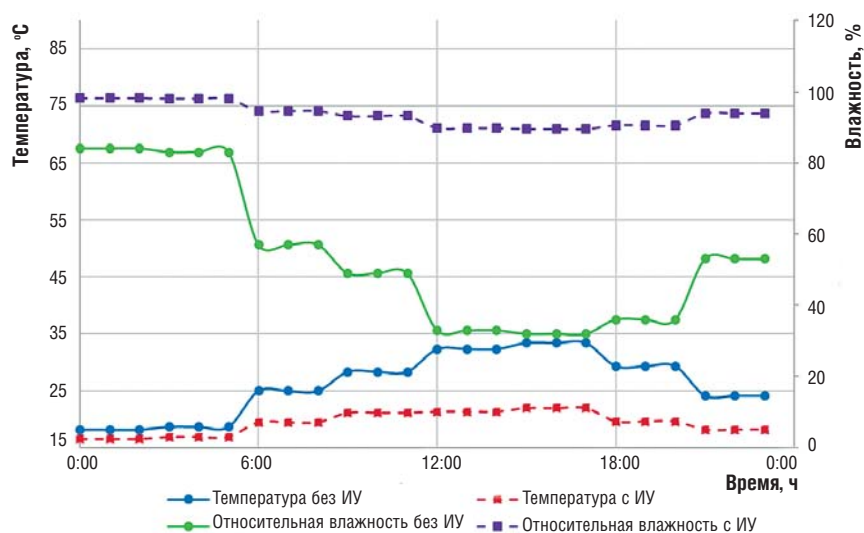
4. Несмотря на технологические сложности, связанные с модернизацией существующего оборудования, оптимальный выбор системы охлаждения для КВОУ и эффективные меры по сокращению температурных ограничений позволяют достигать высокого экономического эффекта для электростанций и окупаться менее чем за семь лет (дисконтированный срок окупаемости).

5. При внедрении системы охлаждения на ГТУ необходимо выполнить детальный технико-экономический анализ для принятия решения.

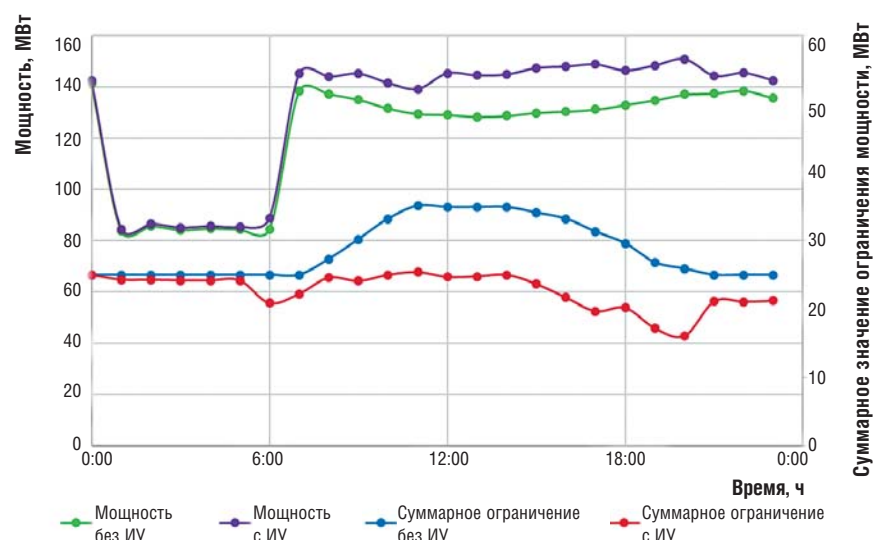
6. Экономический эффект системы охлаждения испарительного типа на газотурбинной установке за один день работы по ДПМ составляет 287 197,33 р., за один день работы программе КОМ составляет 82 401,29 р. 

Литература

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С., Осыка А.С. Газотурбинные энергетические установки. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций – 2002.
3. Шахин Н.Н., Акул Х. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки /Турбины и Дизели. 2011, № 3. С. 8-11.
4. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
5. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства – Учебн. пособие – М-во общего и профессионального образования РФ: СПб гос. акад. холода и пищевых технологий. – 1998.



 **Рис. 7. Изменение температуры и влажности воздуха на всасывании КВОУ ГТУ в течение одного дня**



 **Рис. 8. Изменение суммарных ограничений мощности в течение одного дня**