

Таблица 1. Характеристики ГТУ SGT5-4000F в условиях ISO 2314

ГТУ	Мощность нетто, МВт	КПД нетто, %	Температура выхлопных газов, °С	Расход выхлопных газов, кг/с
SGT5-4000F	279,1	38,7	583,5	682,9

Расчеты производились с использованием математической модели ПГУ, включающей в себя упрощенные модели ГТУ и ПТУ (без задания конструктивных характеристик) и модель котла-утилизатора определенной конструкции.

Модель ПГУ была составлена в программе Boiler Designer. Давления в контурах ПГУ принимались исходя из номинальных параметров данного котла-утилизатора (табл. 2).

При моделировании ГТУ учитывались их разгрузочные и климатические характеристики, полученные в ходе обработки численных данных компаний-изготовителей методами регрессионного анализа [2] (рис. 2–6).

Анализ характеристик SGT5-4000F (рис. 2, 4) показывает, что ГТУ обеспечивает стабильно высокую температуру выхлопных газов при разгрузке (температура газов снижается не более, чем на 10 °С), однако при снижении температуры наружного воздуха с

+15 °С до –30 °С снижение температуры выхлопных газов достигает 40 °С. Расход выхлопных газов определяется, в первую очередь, расходом воздуха в камеру сгорания ГТУ, который регулируется положением ВНА и ПНА компрессора. Расход увеличивается с нагружением ГТУ и при снижении температуры наружного воздуха до –5 °С. Очевидно, при дальнейшем снижении температуры наружного воздуха система регулирования ГТУ уменьшает массовый расход воздуха в компрессор, тем самым ограничивая вырабатываемую мощность. При этом КПД немного снижается.

Таблица 2. Исходные данные к математической модели блока ПГУ-400

Наименование величин	Значение
Давление на выходе из ПЕВД, МПа	11,87
Давление на выходе из ЦВД, МПа	3,0
Давление на выходе из ПП, МПа	2,84
Давление на выходе из ПЕНД, МПа	0,37
Внутренний относительный КПД ЦВД	0,86
Внутренний относительный КПД ЦСД	0,9
Внутренний относительный КПД ЦНД	0,87
Давление в конденсаторе, кПа	5
Номинальный расход пара в ЦВД, кг/с	73,4
Номинальный расход пара в ЦСД, кг/с	90,3
Номинальный расход пара в ЦНД, кг/с	101,7
Суммарная поверхность одного котла-утилизатора, м ²	236295

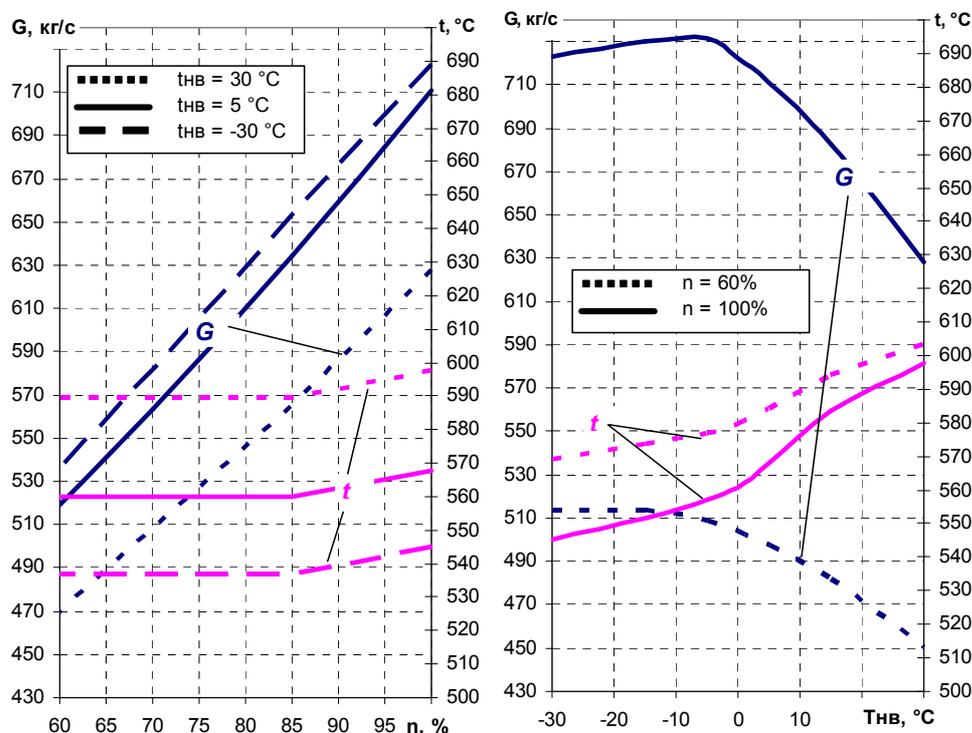


Рис. 2. Изменение расхода и температуры выхлопных газов ГТУ SGT5-4000F в зависимости от разгрузки и изменения температуры наружного воздуха

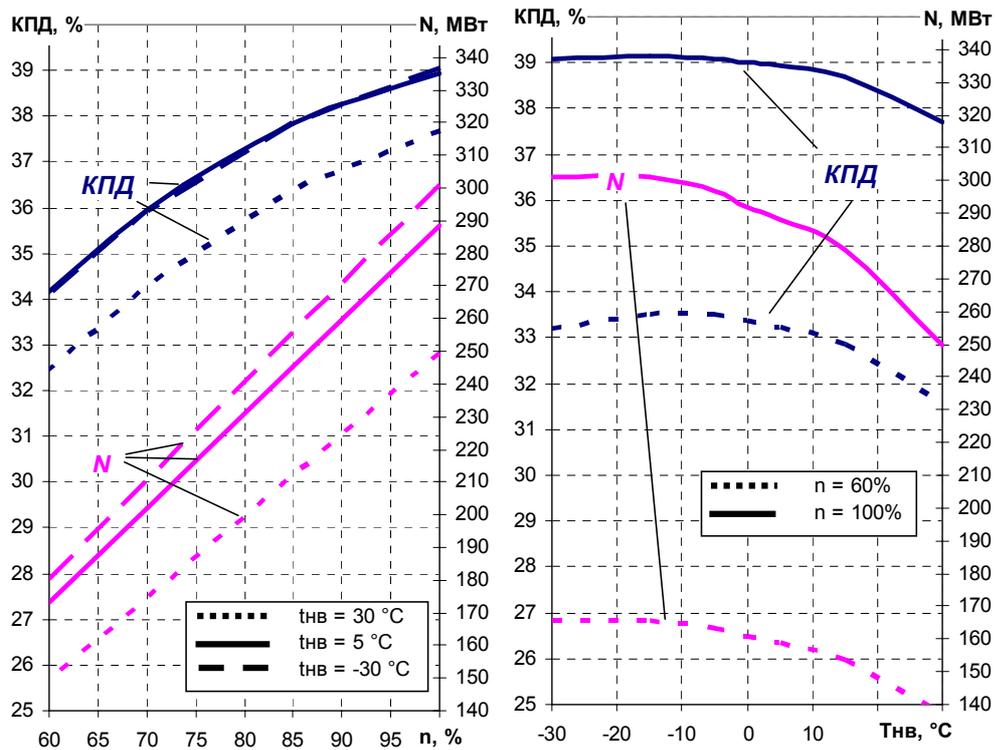


Рис. 3. Изменение КПД и мощности ГТУ SGT5-4000F в зависимости от разгрузки и изменения температуры наружного воздуха

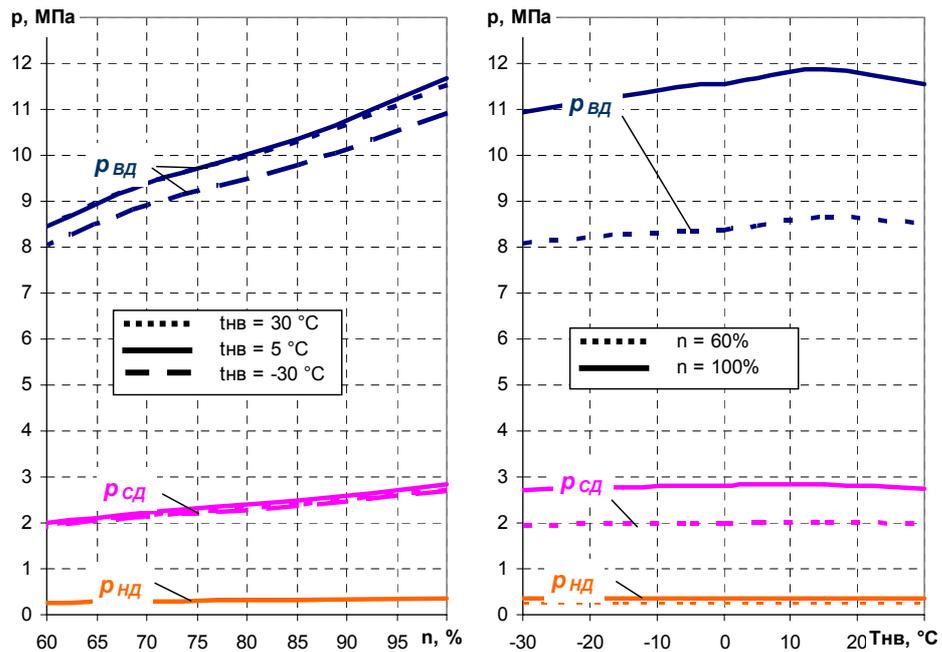


Рис. 4. Изменение давлений в контурах ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

Для анализа данных, полученных в ходе многовариантных расчетов, был использован графоаналитический метод. Ниже (рис. 4–15) приведены графики, характеризующие изменение режимных параметров ПГУ в зависимости от изменения относительной нагрузки ГТУ и температуры наружного воздуха.

Изменение давлений в контурах ПГУ (рис. 4) в значительно большей степени зависит от относительной нагрузки ГТУ, чем от температуры наружного воздуха. Давления во всех контурах при разгрузке до 60 % снижаются в среднем на 30 %. Это связано с уменьшением теплоты, выбрасываемой ГТУ в котел-утилизатор, вследствие резкого сни-

жения температуры выхлопных газов, при низких $T_{НВ}$ сопровождающегося еще и уменьшением их расхода.

Расходы пара в цилиндры ПТУ (рис. 5) также в основном определяются относительной нагрузкой ГТУ и расходом выхлопных газов. Увеличение расхода выхлопных

газов при разгрузке и при снижении температуры наружного воздуха вызывает увеличение расходов пара. При снижении $T_{НВ}$ ниже -5°C наблюдается значительное снижение паропроизводительности КУ, обусловленное причинами, описанными в ходе анализа изменения давлений.

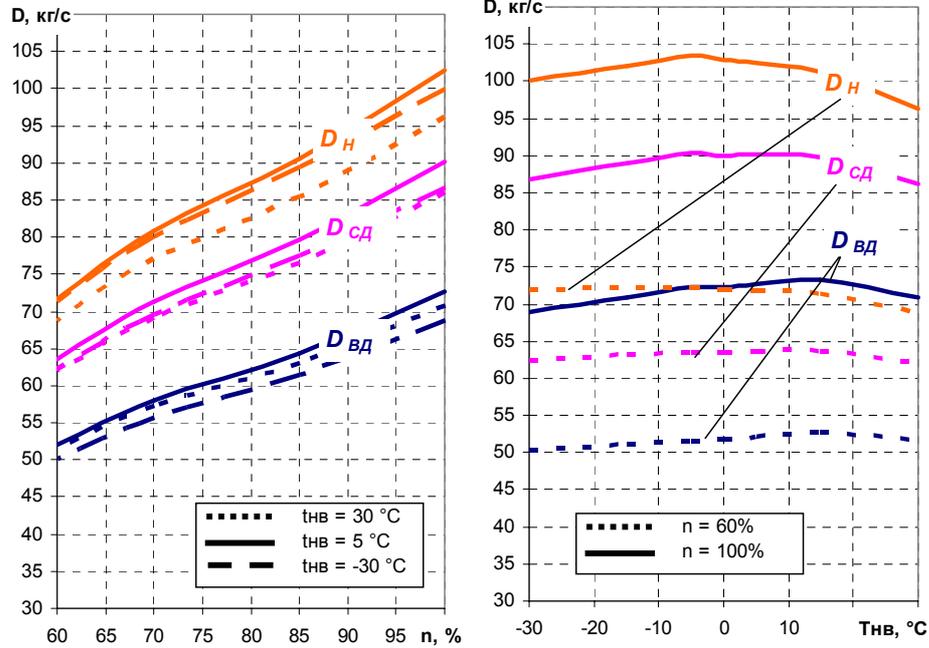


Рис. 5. Изменение расходов пара в контурах ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

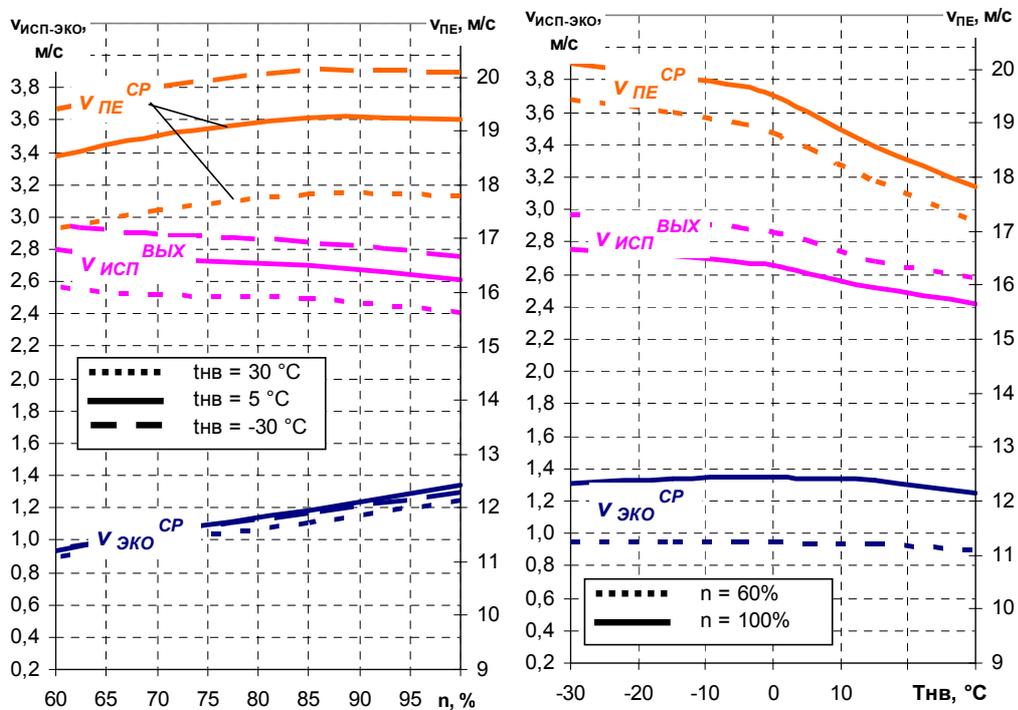


Рис. 6. Изменение средних скоростей пара воды в испарителях, пароперегревателях и экономайзерах котла-утилизатора ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

Изменение скоростей пароводяной среды в поверхностях нагрева (рис. 6), с одной стороны, зависит от расхода и удельного объема этой среды и, с другой стороны, определяет изменение коэффициента теплопередачи. Анализ показывает, что скорости среды достаточно устойчивы к изменению режимных параметров и изменение их по относительной величине находится в пределах

10–30 %. Скорости в экономайзерных поверхностях при снижении температуры наружного воздуха снижаются из-за уменьшения расходов пара в контурах КУ. Скорости пара на выходе из пароперегревателей при снижении $T_{НВ}$, наоборот, растут, что объясняется значительным уменьшением плотности пара из-за снижения давлений.

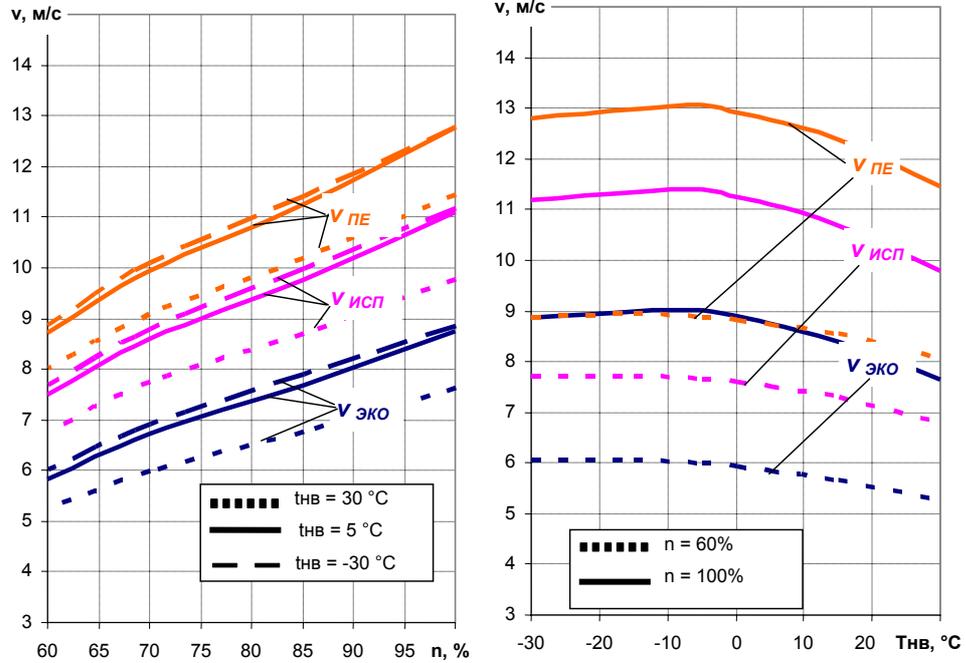


Рис. 7. Изменение средних скоростей газов в испарителях, пароперегревателях и экономайзерах котла-утилизатора ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

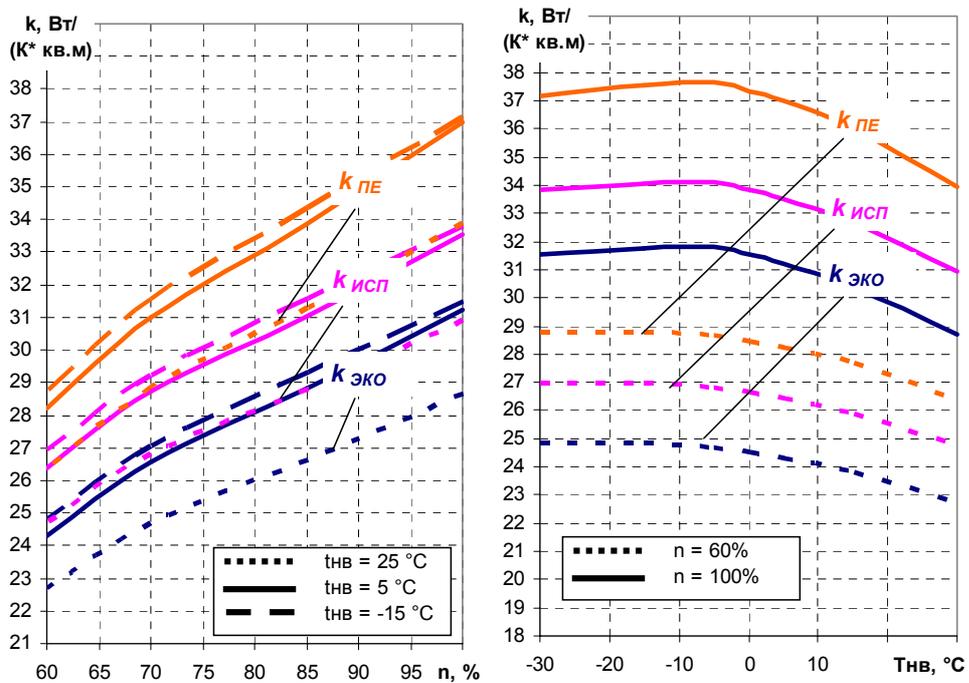


Рис. 8. Изменение средних коэффициентов теплопередачи в испарителях, пароперегревателях и экономайзерах котла-утилизатора ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

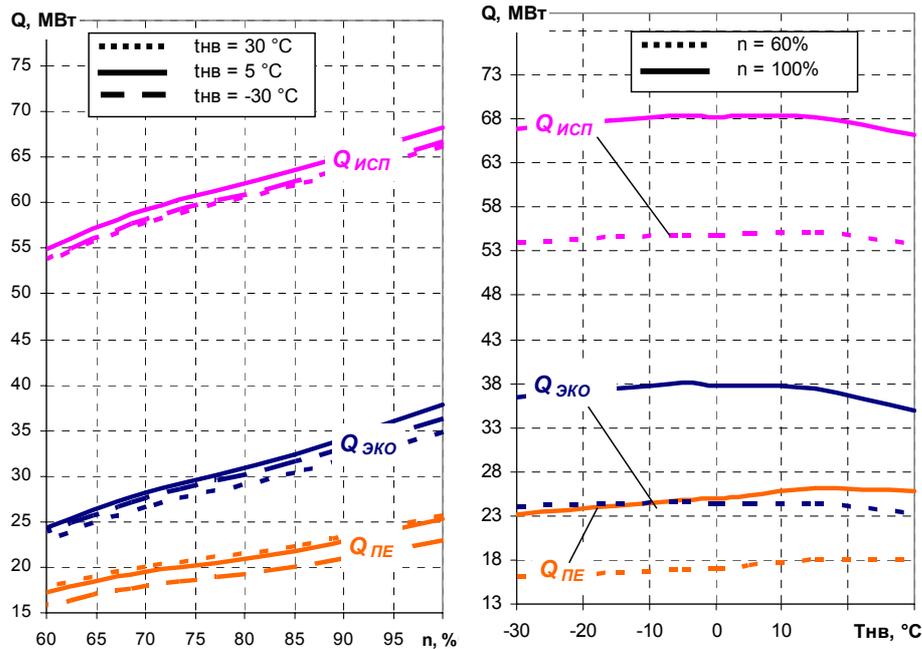


Рис. 9. Изменение среднего тепловосприятия испарителей, пароперегревателей и экономайзеров котла-утилизатора ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

Изменение скоростей газов (рис. 7) также определяется их расходом и удельным объемом. При снижении $T_{нв}$ уменьшение массового расхода выхлопных газов ГТУ сопровождается снижением их температуры (и ростом удельных объемов) (см. рис. 2), что выражается в стабилизации объемных расходов газов и, соответственно, их скоростей.

Скоростной режим сред по обе стороны от поверхностей труб теплообменников определяет изменение коэффициента теплопередачи (рис. 8). Ключевым фактором, влияющим на его величину и ее изменение, является изменение скоростей газов в поверхностях нагрева: вид кривых (рис. 7, 9) идентичен. Анализ показывает, что на испарительные поверхности приходится тепловая нагрузка в 1,5–2 раза большая, чем на все прочие (рис. 9). Изменение тепловосприятий поверхностей нагрева определяется коэффициентами теплопередачи и температурными напорами. Снижение коэффициентов теплопередачи (см. рис. 8) при низких $T_{нв}$ определяет соответствующее уменьшение тепловосприятий поверхностей нагрева.

Изменение теплоты, выбрасываемой ГТУ в газоды КУ, определяется изменением расхода и температуры выхлопных газов (см. рис. 2). Тепловосприятие КУ зависит от

коэффициентов теплопередачи и температурных напоров, и их изменение было подробно рассмотрено выше. Анализ показывает, что соотношение теплоты, передаваемой газами, и теплоты, воспринятой рабочей средой ПТУ, таково, что КПД КУ растет со снижением нагрузки ГТУ и при повышении $T_{нв}$ (рис. 10).

Увеличение КПД котла-утилизатора со снижением паропроизводительности аналогично характеру его изменения у обычных котлов [3]. На рис. 11 показано изменение тепловых потерь в частях паровой турбины. Тепловый перепад в ЦВД более чем в 1,5 раза меньше, чем в других цилиндрах турбины. Характер изменения тепловых потерь определяется изменением давлений в контурах ПГУ (см. рис. 4) и температур пара на выходе из КУ. Так, тепловой перепад в ЦВД и ЦСД немного повышается при разгрузке ГТУ и при увеличении температуры наружного воздуха вследствие увеличения входных температур пара. Тепловый перепад в ЦНД снижается с разгрузкой ГТУ из-за падения давления на входе в цилиндр, так как давление на выхлопе ЦНД поддерживается постоянным. Небольшое снижение теплоперепада в ЦНД при уменьшении $T_{нв}$ определяется соответствующим снижением температуры пара на входе в цилиндр.

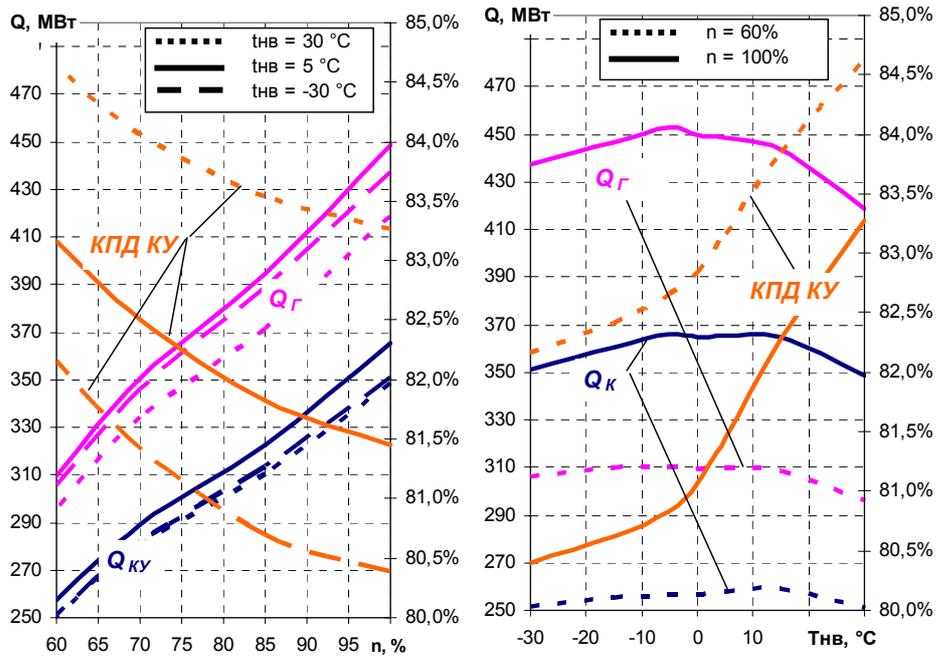


Рис. 10. Изменение суммарного тепловосприятия КУ, тепловой мощности выхлопных газов ГТУ и КПД котла-утилизатора ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

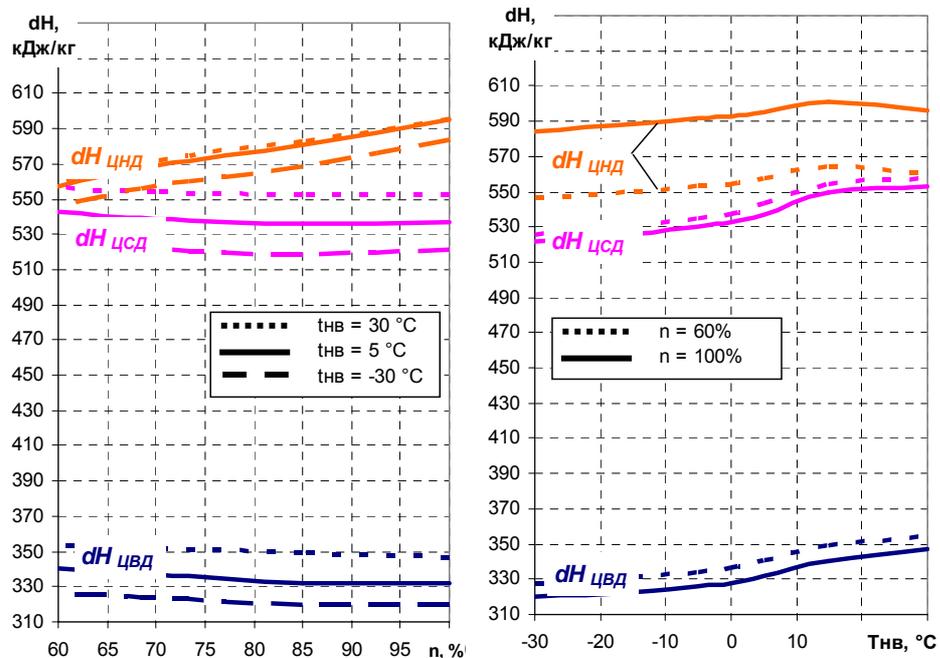


Рис. 11. Изменение теплоперепадов в цилиндрах паровой турбины ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

Изменение теплоперепадов (рис. 11) и расходов пара (рис. 5) через цилиндры турбины определяет изменение их мощности и их характер (рис. 12–18). Ввиду незначительного изменения теплоперепадов в паровой турбине, определяющее влияние на изменение ее мощности оказывает изменение паропроизводительности КУ. Очевидно также, что мощность, потребляемая главными насосами ПТУ (питательными и конденсационным), значительно снижается с разгрузкой блока (это снижение достигает 40 % при разгрузке

ГТУ до 60 % от номинальной мощности). Это обстоятельство делает весьма перспективным применение устройств плавного регулирования частоты вращения роторов насосов.

Рассмотрим изменение КПД ПГУ, ГТУ, КУ и ПТУ (рис. 13) в зависимости от n и $T_{нв}$.

КПД ПТУ практически не зависит от температуры наружного воздуха и относительной нагрузки ГТУ при условии разгрузки ПТУ на скользких параметрах пара. Этот вывод соответствует результатам расчетных и экспериментальных исследований работы паро-

силовых блоков на частичных нагрузках, приведенных в работах А.Г. Прокопенко [4], В.А. Иванова [5] и С.Г. Самойловича [6]. Таким образом, на изменение КПД ПГУ влияние оказывает только изменение КПД ГТУ и КПД КУ, причем превалирует влияние первого фактора. Так, значительное снижение КПД ГТУ с ее разгрузкой определяет чуть мень-

шее (из-за повышения КПД КУ) снижение КПД ПГУ. Влияние $T_{нв}$ на КПД ГТУ и КПД КУ противоположно, поэтому КПД ПГУ от $T_{нв}$ практически не зависит, хотя следует отметить, что при значительно высоких и низких температурах наружного воздуха КПД ПГУ чуть меньше из-за снижения КПД КУ (в первом случае) и КПД ГТУ (во втором).

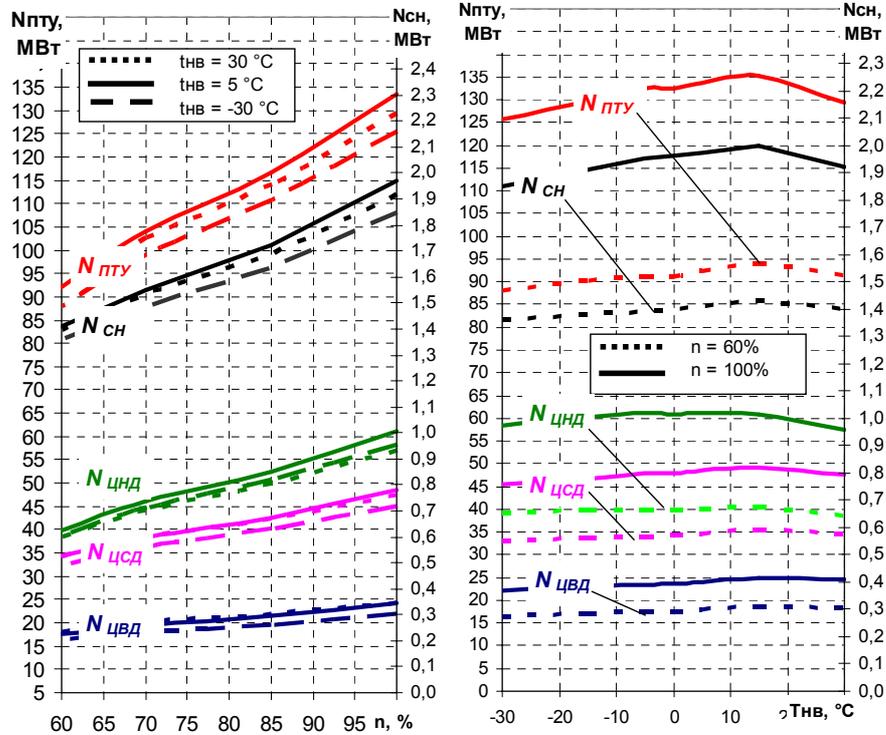


Рис. 12. Изменение мощностей цилиндров паровой турбины в ПГУ-400к-С и мощности, потребляемой главными насосами ПТУ, в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

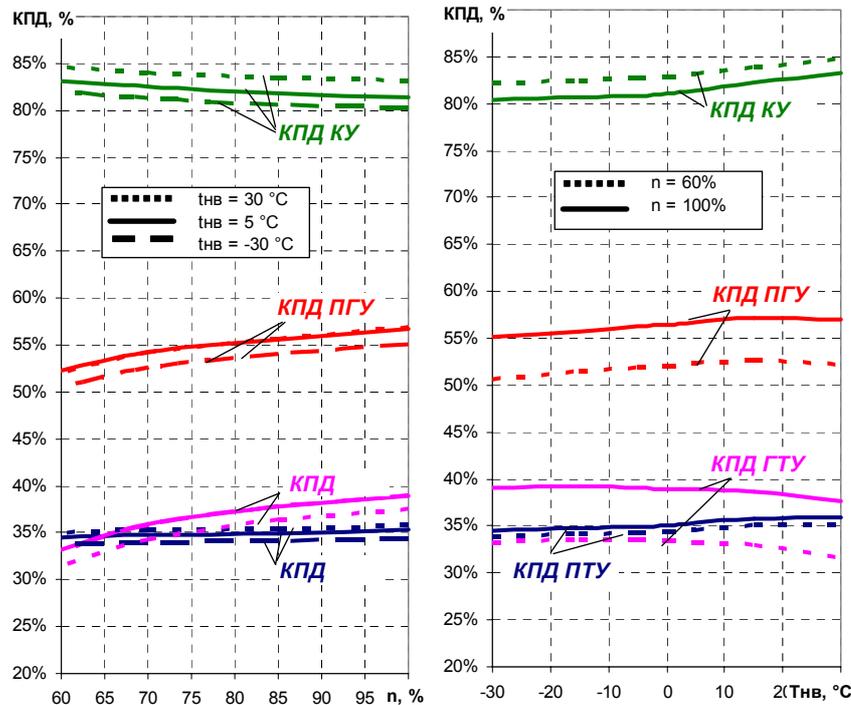


Рис. 13. Изменение КПД ПТУ, ГТУ, КУ и ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{нв}$

Изменение мощности ПГУ при изменении режимных параметров носит более простой характер и полностью определяется изменением мощности ГТУ (рис. 14).

На рис. 15 приведена характеристика КПД и мощности ПГУ-400 с SGT5-4000F.

Диапазон изменения мощности при температуре 5 °С составляет 250–420 МВт, пределы изменения КПД – 52–57 %. Снижение $T_{НВ}$ до -30 °С приводит к падению КПД ПГУ примерно на 1 % (абс.) и росту мощности на 2–3 %.

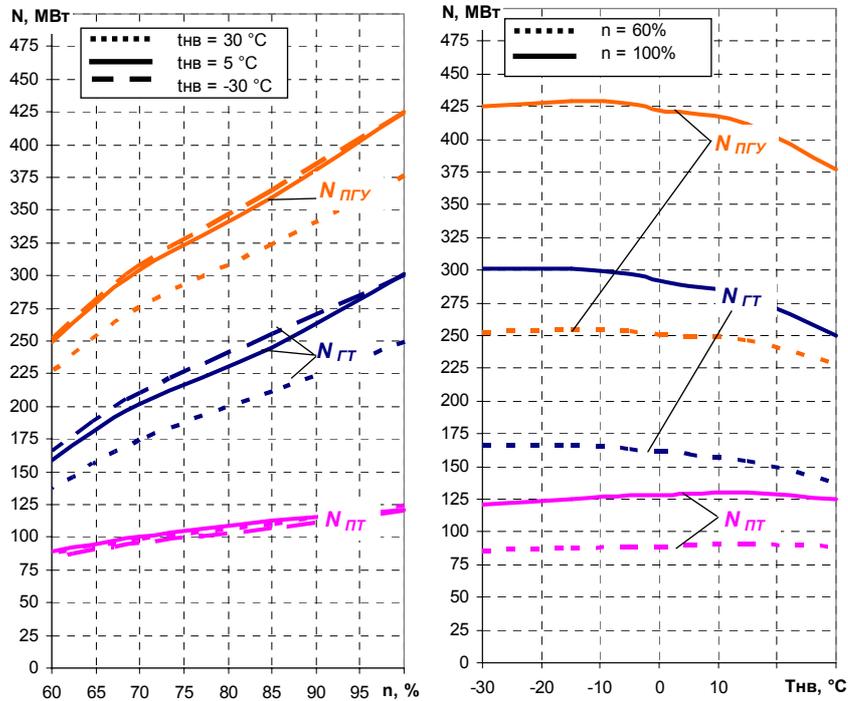


Рис. 14. Изменение мощностей ГТУ, ПТУ и ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

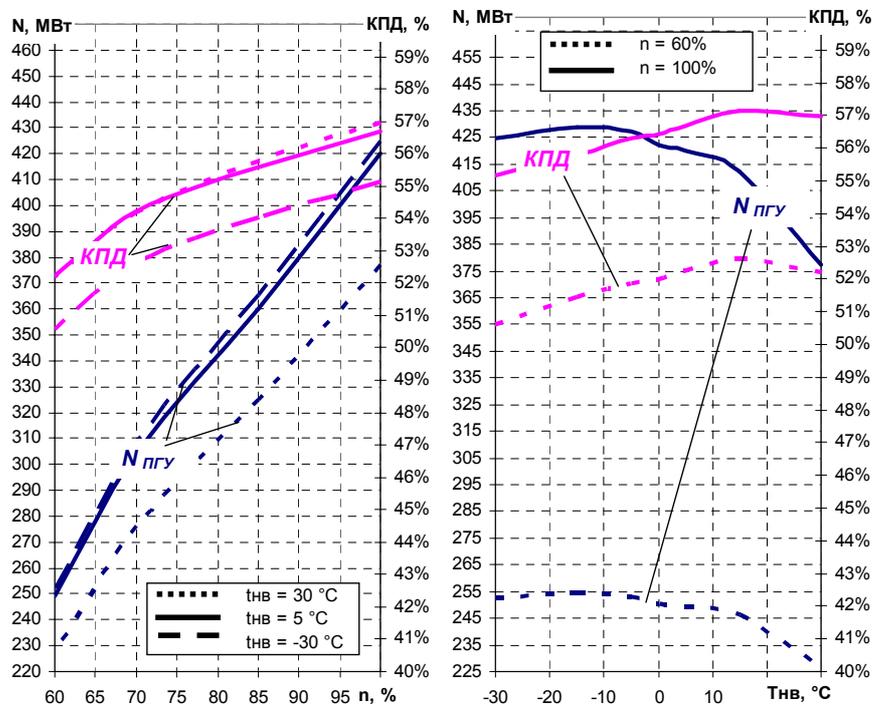


Рис. 15. Изменение мощности и КПД ПГУ-400 с ГТУ SGT5-4000F в зависимости от снижения нагрузки ГТУ при различных значениях $T_{НВ}$

Заключение

Проведенное численное исследование показателей основного оборудования ПГУ-400 с газотурбинной установкой SGT5-4000F на сниженных нагрузках при различных значениях температуры наружного воздуха и анализа изменения параметров теплоносителей и показателей котла-утилизатора и паротурбинной установки, а также КПД ПГУ в зависимости от относительной нагрузки газовой турбины и температуры наружного воздуха показали, что КПД котла-утилизатора растет при разгрузке блока (на нагрузке 60 % от номинальной его КПД выше номинального на 2–2,5 %) и при увеличении температуры наружного воздуха (при $T_{\text{нв}} = 30$ °С КПД КУ выше номинального на 1 %), а КПД ПТУ во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок и $T_{\text{нв}}$ практически постоянен (при условии работы блока на скользких давлениях и сохранении номинальных температур пара на входе

в цилиндры ПТУ) и определяется номинальными параметрами паротурбинного цикла ПГУ. В режимах, в которых температура острого пара не выдерживается на номинальном значении, КПД ПТУ снижается.

Список литературы

1. **Инвестиционная** программа тепловых генерирующих компаний Холдинга РАО «ЕЭС России» на 2006–2010 гг. / Режим доступа: http://www.rao-ees.ru/ru/info/about/invest_inov/inv_programm/.
2. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2-х т. – М.: Финансы и статистика, 1986.
3. **Елизаров П.П.** Эксплуатация котельных установок высокого давления. – М.: Госэнергоиздат, 1961.
4. **Прокопенко А.Г., Мысак И.С.** Стационарные, переменные и пусковые режимы энергоблоков ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. **Иванов В.А.** Режимы мощных паротурбинных установок. 2-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
6. **Самойлович Г.С., Трояновский Б.М.** Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. – М.: Энергоиздат, 1982.

Мельников Юрий Викторович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Мошкарин Андрей Васильевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Шельгин Борис Леонидович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: admin@tes.ispu.ru