

УДК 62-69

Абсорбционные термотрансформаторы
для рециклинга тепла на ТЭС

С.Л. Елистратов, Н.В. Миронова

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: elistratov.sl@yandex.ru

На основе общего анализа разнородных источников сбросного тепла на ТЭС с учетом передового мирового и отечественного опыта создания парокомпрессионных и абсорбционных термотрансформаторов большой мощности показана возможность значительного сокращения тепловых потерь за счет интеграции в тепловые схемы существующих и проектируемых ТЭС абсорбционных тепловых насосов и холодильных машин различных конструкций и мощности. Предлагается провести комплексную оптимизацию станций путем создания систем внутристанционной тригенерации. Учитывая специфические условия работы конденсаторов паровых турбин, в качестве рабочих тел предлагается использовать более дешевые многокомпонентные водные растворы на основе соли LiCl, не уступающие по эффективности импортным растворам LiBr с антикоррозионными добавками.

Ключевые слова: тепловая электростанция, рециклинг сбросного тепла, абсорбционный термотрансформатор, водно-солевые растворы.

Для современной энергетики создание и внедрение технологий, позволяющих повысить эффективность работы ТЭС и при этом снизить нагрузку на окружающую среду, являются важнейшими задачами. Тепловые стоки низкого температурного потенциала являются одним из основных загрязнителей [1] вследствие общего несовершенства технологий использования топлива для выработки электроэнергии и тепла. Парогазовые электростанции ПГУ-ТЭЦ — это наиболее эффективные современные электростанции. Но даже им свойственны большие потери тепловой энергии низкого температурного потенциала (табл. 1).

На рис. 1 видно, что даже на современной парогазовой установке (ПГУ) потери тепловой энергии в отопительный период достигают больших значений. В летний сезон, когда станция отпускает тепло только на горячее водоснабжение, его потери возрастают

Таблица 1
Наиболее актуальные источники низкопотенциального тепла на ПГУ-ТЭЦ [2]

Источник низкопотенциальной теплоты	Резерв экономии, тыс. т у.т./год
Циркуляционная вода, охлаждающая конденсатор паровой турбины	43,8 ÷ 394,2
Обессоленная вода, охлаждающая турбогенератор	2,6
Продувочная вода градирни	0,9 ÷ 2,3
Обратная сетевая вода	21,0 ÷ 123,5

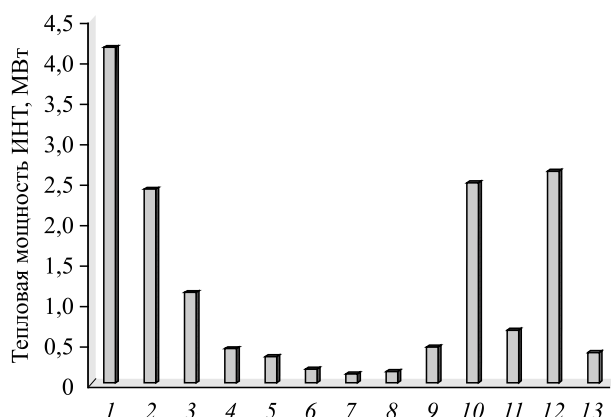


Рис. 1. Тепловая мощность источников низкопотенциального тепла для блока ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ (г. Санкт-Петербург) [2].

- 1 — система циркуляционного водоснабжения (тепловая мощность системы приведена для максимального отопительного режима ПГУ-ТЭЦ (вентиляционный пропуск)),
 2 — система охлаждения генератора, 3 — система смазки подшипников турбины,
 4 — система регулирования турбины, 5 — система смазки подшипников насоса,
 6 — система охлаждения двигателей насосов, 7 — система охлаждения конденсата уплотнителей,
 8 — система охлаждения пробоотборных точек, 9 — система охлаждения грязного конденсатора,
 10 — продувочная вода градирни, 11 — непрерывная продувка барабанов котлов,
 12 — канализационные стоки, 13 — сбросы химводоочистки.

на порядок. Отметим, что на ТЭС других типов также существуют технологические ограничения при работе в летний период, когда температура охлажденной воды в чаше градирни превышает 20 °С. Это приводит к снижению эффективности генерирующего и вспомогательного оборудования. Мощность турбины падает до 10 % из-за снижения вакуума в конденсаторе, выработка электроэнергии — до 6 % по причинам недоохлаждения водорода в газоохладителях электрогенераторов, превышения температуры масла в маслоохладителях свыше допустимого уровня и др.

Многообразие и непроизводительный расход источников низкопотенциального тепла (ИНТ) делают актуальной задачу разработки эффективных технологий возврата (рециклинга) в технологический цикл ТЭС их термического потенциала с получением холода и теплоты для повышения энергоэффективности ТЭС [3].

Существует ряд способов, направленных на достижение поставленной цели. Один из них — использование тепловых насосов парокомпрессионного типа (ПКТН) с использованием ИНТ для дополнительного отпуска теплоты потребителям и для собственных нужд станции [4] с частичным вытеснением пиковых водогрейных котлов или пикового сетевого подогревателя ТЭЦ. Однако имеются проблемы, препятствующие их широкому применению на ТЭС.

Во-первых, использование для привода компрессоров ПКТН электроэнергии как основного коммерческого продукта ТЭС. Это не всегда выгодно и только в отдельных случаях (например, при суточных провалах электропотребления) может дать заметный экономический эффект.

Во-вторых, применение в ПКТН дорогостоящих рабочих тел (фреонов), воздействие которых способствует потеплению климата и разрушению озонового слоя Земли [5].

В-третьих, технические трудности создания широкого типоряда высокотемпературных (свыше 80 °С, от единиц до десятков мегаватт единичной мощности) ПКТН как неотъемлемого конструктивного элемента ТЭС. Здесь следует особо отметить ранние российские разработки в области проектирования высокотемпературного теплового

насоса теплопроизводительностью 23 МВт, использующего в качестве рабочего тела углекислый газ [6]. Они должны в условиях ориентации современной России на импортозамещающие технологии получить второе дыхание, и не только в энергетической отрасли [7].

Таким образом, по указанным выше причинам интеграция существующих ПКТН в технологический цикл действующих и проектируемых ТЭС в качестве постоянного экономически выгодного элемента энерготехнологии в настоящее время представляется проблематичной.

С целью экономии энергоресурсов, уменьшения теплового загрязнения и повышения эффективности выработки электрической и тепловой энергии многие страны интегрируют абсорбционные термотрансформаторы (АТТ) в схему ТЭС. От ПКТН их отличает возможность использования в качестве приводной энергии источников тепла с температурой более 70 °С, вследствие чего перспективность их интеграции на постоянной основе в состав ТЭС резко повышается. Электроэнергия при этом расходуется только на обеспечение работы растворных насосов и систему автоматизации (около 5 кВт на 1000 кВт производимого холода). Не электроэнергия, а пар теплофикационных или промышленных отборов турбин с давлением 0,3–0,7 МПа, теплота выхлопных газов газопоршневых и газотурбинных установок (ГТУ), теплота охлаждения высокотемпературных продуктов газификации или сжигания синтез-газа и горючих отходов в перспективных ПГУ с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) — это основные виды приводной энергии для реализации обратных термодинамических циклов АТТ на ТЭС. Эффективность выработки холода в абсорбционной холодильной машине (АХМ) определяется значением холодильного коэффициента, равного отношению количества полученного холода к затратам высокотемпературного тепла (приводной энергии), подведенного к генератору АХМ [8]. Холод как основной продукт работы АХМ является внутренним резервом повышения эффективности выработки электроэнергии за счет охлаждения в летний период воздуха на входе в ГТУ-ТЭЦ, снижения температуры охлаждающей воды на входе в конденсатор ПТУ и другого оборудования ТЭС.

В АТТ в качестве рабочих тел используются безопасные для человека и окружающей среды водно-солевые растворы. Конструкция АТТ не содержит движущихся деталей, они практически не создают шума, а их основные аппараты работают под давлением ниже атмосферного. Единичная производительность выпускаемых АТТ (тепловых насосов и холодильных машин в одно- и многоступенчатом исполнении) достигает десятков мегаватт. Представленные в табл. 2 данные свидетельствуют не только о разнообразии современных и перспективных схем работы АТТ при производстве тепла свыше 90 °С и холода до –5 °С, но и о богатом выборе на ТЭС теплоисточников высокой температуры (пар, горячая вода, дымовые газы и др.) для обогрева генераторов. Это позволяет организовать рециклинг всего доступного потенциала ИНТ в технологическом цикле ТЭС с минимальными затратами электроэнергии.

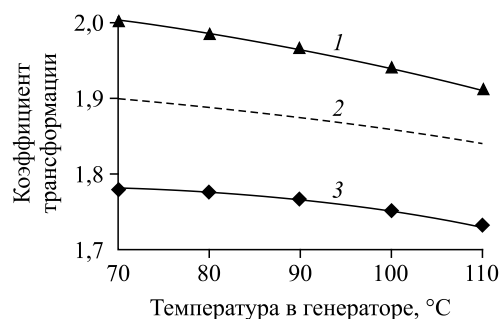
Отметим еще один актуальный аспект проблемы. Традиционно в качестве рабочего тела в АТТ применяют водный раствор соли LiBr [9], который при наличии очевидных преимуществ обладает также рядом существенных недостатков: высокой покупной стоимостью, коррозионной активностью и термической неустойчивостью при 130 °С и выше. Термическая неустойчивость раствора этой соли не позволяет эффективно использовать повышающие АТТ, в которых можно получить водяной пар с низкими параметрами на базе тепловых стоков среднего температурного потенциала.

Таблица 2

Современные абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы
зарубежного и российского производства [10–12]

Тип АТТ, фирма, страна-производитель, вид при- водной энергии	Производительность, характеристики теплоноси- телей, эффективность
АБХМ (абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины)	
Одноступенчатая, Thermax, Индия Горячая вода: 120–150 °С	Холодопроизводительность: 0,35–7,65 МВт Температура охлажденной воды до 0 °С Холодильный коэффициент: 0,7–0,75
Двухступенчатые, Thermax, Индия Горячая вода: 150–180 °С Выхлопные газы: 275–600 °С	Холодопроизводительность: 0,175–8,8 МВт Температура охлажденной воды до 1 и –5 °С с раствором гликоля Холодильный коэффициент: 1,4–1,45
Двухступенчатые, Thermax, Индия Водяной пар: 0,3–1,0 МПа	Холодопроизводительность: 0,426–6,65 МВт Температура охлажденной жидкости до 1 и –5 °С с раствором гликоля Холодильный коэффициент: 1,43
Двухступенчатые, Thermax, Индия Природный газ, жидкий нефтяной газ, сжиженный природный газ, пропан, керосин, биогаз, дизельное топливо	Холодопроизводительность 0,175–0,545 МВт Температура охлажденной воды до 1 °С и –5 °С с раствором гликоля Холодильный коэффициент: 1,4–1,45
Трехступенчатые, Thermax, Индия Водяной пар: 1,0–2,5 МПа Горячая вода: 190–225 °С	Холодопроизводительность: 0,35–3,5 МВт Минимальная температура охлажденной воды: 5 °С Холодильный коэффициент: 1,8
Двухступенчатый чиллер BS, Broad, Китай Насыщенный пар: 0,3–0,9 МПа	Холодопроизводительность: 0,2–11,63 МВт
Двухступенчатый чиллер ВН, Broad, Китай Горячая вода: 150–180 °С	Холодопроизводительность: 0,2–11,63 МВт
Одно- и двухступенчатые, «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск. Водяной пар: 0,07–0,8 МПа	Холодопроизводительность: 0,66–4,0 МВт
Одноступенчатые с водяным обогревом, «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск Горячая вода: 115 °С	Холодопроизводительность: 0,66–4,0 МВт
Одноступенчатые с низкотемпературным водяным обогревом, «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск Горячая вода: 90 °С	Холодопроизводительность: 0,55–3,30 МВт
АБТН (Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы) понижающие	
Двухступенчатые, Thermax, Индия Выхлопные газы, водяной пар, горячая вода, жидкое/газообразное топливо	Теплопроизводительность: 0,25–40 МВт Температура нагреваемой воды: до 90 °С
Одноступенчатый, «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск. Пар: 0,5 МПа	Теплопроизводительность: 1,73–11,0 МВт Температура нагреваемой воды: 70 °С
Одноступенчатый, «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск. Природный газ	Теплопроизводительность: 1,75–3,0 МВт Температура нагреваемой воды: до 90 °С
АБТН (Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы) повышающие	
Двухступенчатые, Thermax, Индия Среднепотенциальный источник тепла: водяной пар, горячая вода, жидкое/газообразное топливо	Теплопроизводительность: 0,5–10 МВт Температура горячей воды на выходе: до 160 °С
Одноступенчатый тепловой насос серии BDS, Broad, Китай. Среднепотенциальный источник тепла: водяной пар 0,4–0,6 МПа, жидкое/газообразное топливо, вода 30/20 °С, 40/30 °С	Теплопроизводительность: 0,3–56,5 МВт Температура горячей воды: 80–90 °С Пределы регулирования мощности: 5–115 %
Термотрансформаторы (совместное производство тепла и холода)	
Двухступенчатый чиллер BE, Broad, Китай Выхлопные газы: 400–600 °С	Холодопроизводительность: 0,2–11,63 МВт Температура охлажденной воды: 7 °С Теплопроизводительность: 0,15–7,67 МВт Температура нагретой воды: 90 °С; 65 °С (ГВС)
BZ — газовые АБХМ, Broad, Китай Природный газ, дизельное топливо	Холодопроизводительность: 0,2–11,63 МВт Температура охлажденной воды: 7 °С Теплопроизводительность: 0,18–8,97 МВт Температура нагретой воды: 90 °С; 65 °С (ГВС) Диапазон регулирования: 5–115 %
Одноступенчатые с огневым обогревом «Теплосибмаш», Россия, г. Новосибирск Природный газ	Холодопроизводительность: 0,66–4,0 МВт Температура охлажденной воды: 7 °С Теплопроизводительность: 0,53–3,2 МВт Температура нагретой воды: 70 °С

Рис. 2. Зависимость коэффициента трансформации от температуры греющего источника при работе АТТ на различных рабочих телах. LiCl + CsCl (1), LiBr (2), LiCl (3).



Этот продукт в России в настоящее время не производится, а состав сложных добавок в него для устранения коррозии является фирменным секретом и ставит задачу его импортозамещения.

Вместо LiBr в АТТ могут применяться водно-солевые растворы на основе LiCl. Но, несмотря на низкую стоимость, LiCl обладает меньшей растворимостью по сравнению с LiBr. АТТ на основе водного раствора LiCl имеют также другие известные ограничения в использовании [9]. Например, если в бромисто-литиевом АТТ можно обеспечить охлаждение теплоносителя до 5–7 °C, а в современных машинах и до –5 °C, то в хлористо-литиевых ниже 10–15 °C на практике получить трудно. Для некоторых областей использования АТТ в энергетике, таких как охлаждение конденсаторов паровых турбин, температура циркуляционной воды ниже 15 °C не требуется из-за конструктивных и эксплуатационных сложностей с поддержкой в конденсаторе глубокого вакуума. Кроме того, смесь солей LiCl+LiNO₃ обладает сходной с LiBr растворимостью, а растворимость смеси LiCl+CsCl выше, чем у раствора LiBr [9].

Расчет термодинамической эффективности одноступенчатого АТТ по методике, предложенной в работе [8], показал, что при использовании водного раствора LiCl АТТ хотя и уступает по эффективности АТТ с LiBr (рис. 2), но обеспечивает более высокую производительность благодаря тому, что при равных значениях давления и концентрации растворов плотность паров LiCl выше. Это позволяет использовать для работы генераторов АТТ греющие источники тепла с относительно более низкой температурой при одинаковых тепловых нагрузках. Переход на низкие параметры греющего источника является одним из трендов развития технологий абсорбционного охлаждения, что особенно актуально для нашей страны, поскольку сейчас единственный разработчик АТТ, нового поколения с низкотемпературными генераторами — фирма «Теплосибмаш» [12].

Таким образом, современные АТТ позволяют практически полностью снять ограничения, связанные с недостаточным охлаждением оборудования, и обеспечить надежную работу основного и вспомогательного оборудования с возвратом (рециклингом) непродуцированных тепловых стоков в технологический процесс ТЭС, в том числе при дополнительном отпуске тепла промышленным и гражданским потребителям в виде горячей воды или водяного пара с низкими параметрами.

Для работы генераторов АТТ можно задействовать все виды имеющейся на ТЭС высокопотенциальной тепловой энергии (горячая вода, отборы пара из турбин, выхлопные газы ГТУ и др.) или низкосортные виды топлива, включая горючие отходы для их необходимой утилизации. С учетом высокой концентрации и разнообразия ИНТ и источников высокопотенциального тепла можно рассматривать ТЭС в качестве идеальной самодостаточной площадки для эффективной реализации различных технологий тригенерации.

В настоящее время для развития экономики особо важным представляется комплексное решение вопроса о переводе существующих и разрабатываемых АТТ на водные растворы соли LiCl и смесевые рабочие тела на ее основе в качестве альтернативы импортируемым водным растворам соли LiBr с ингибиторами коррозии.

Список литературы

1. Гутенёв В.В., Кулагина Т.А., Кулагина Л.В., Крючков Г.П., Матюшенко А.И., Русак О.Н., Турутин Б.Ф. Экология техносферы: учеб. пособие. М.: Маджента, 2008. 468 с.
2. Молодкина М.А. Повышение технико-экономических показателей парогазовых тепловых электростанций путем утилизации низкопотенциальной теплоты с использованием тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 16 с.
3. Елистратов С.Л. Рециклинг энергии // Первый доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет» Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия». М., 2020. Вып. 1. С. 54–64.
4. Гапо Е.Г., Козлов С.А., Пузаков В.С., Разорёнов Р.Н., Свешников Н.И., Степанова М.В. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре. М.: Изд.-во «Перо», 2016. 204 с.
5. Calm J.M. The next generation of refrigerants – Historical review, consideration, and outlook // Intern. J. Refrigeration. 2008. Vol. 31. P. 1123–1133.
6. Калинин И.М., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И. Тепловые насосы на диоксиде углерода для систем теплогенерирования // Вестн. РАЕН. 2009. № 1. С. 81–86.
7. Елистратов С.Л. Высокотемпературные тепловые насосы // Второй доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие десять лет» Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия». М., 2021. Вып. 2. С. 87–101.
8. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.
9. Бараненко А.В., Караван С.В., Пинчук О.А., Караван Д.В. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов. М.: Изд.-во «Перо». 2014. 393 с.
10. Абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина Thermax. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://abxm-thermax.ru> (дата обращения: 10. 07. 2022).
11. BROAD GROUP в России – АБХМ, АБТН. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://broadrussia.ru> (дата обращения: 10.07.2022).
12. Высокоэффективное энергосберегающее оборудование российского производства. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://teplosibmash.ru> (дата обращения: 10.07.2022).

*Статья поступила в редакцию 26 июня 2022 г.,
после доработки — 2 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*