

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены технические решения по утилизации скрытой теплоты парообразования водяных паров продуктов сгорания водогрейных котлов и когенерационных газопоршневых агрегатов с применением конденсационных поверхностных экономайзеров и абсорбционных тепловых насосов и проанализирована их эффективность применительно к современным условиям эксплуатации систем теплоснабжения.

ANNOTATION

The technical solutions of water steam vapor latent heat of vaporization recovery from boilers and ICE-units combustion products with usage of condensing economizers and absorption heat pumps and performance in relation to the current operating conditions of district heating systems are examined and analyzed.

К вопросу о повышении эффективности отопительных котельных и мини-ТЭЦ

В. А. Седнин, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» БНТУ
Д. М. Райко, магистрантка БНТУ
В. М. Левин, главный инженер УП «Минсккоммунтеплосеть»

Одним из известных мероприятий по повышению использования потенциала газового топлива на котельных является утилизация скрытой теплоты водяных паров дымовых газов [1–6]. Однако, несмотря на эффективность, это техническое решение на постсоветском пространстве до сих пор не получило широкого распространения. В то же время зарубежные производители котельного оборудования выпускают конденсационные бытовые котлы и конденсационные поверхностные экономайзеры для промышленных котлов малой и средней мощности. Ещё одним из стимулирующих факторов использования низкопотенциальной теплоты в энергетике и промышленности является появление на мировом энергетическом рынке надёжных абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН) [2].

Напомним, что тепловой насос — это устройство непрерывного действия, предназначенное для передачи теплоты от источника с более низкой температурой к источнику с более высокой температурой. Известно несколько технологий, позволяющих реализовать данный процесс теплопередачи. В промышленных приложениях наиболее известны две из них: пароконденсационная и абсорбционная. АБТН [2, 8] уступают по энергетическим характеристикам пароконденсационным машинам, но если

последние для своей работы требуют более ценную механическую (электрическую) энергию, то первые могут использовать относительно дешёвую тепловую энергию среднего или даже низкого потенциала (теплоту пара низкого и среднего давления, перегретой воды, выхлопных газов печей или газовых двигателей внутреннего сгорания и т. п.). Так как концентрация компонентов в растворе не может отличаться от величины, соответствующей уравнению равновесия раствора, то это делает возможным конденсацию (абсорбцию) холодного пара более горячим жидким раствором до выравнивания концентраций в соответствии с указанным уравнением. Эти обстоятельства и определяют целесообразность использования АБТН в энергетике и промышленности.

В простейшем случае АБТН представляет собой сочетание четырёх теплообменников, размещённых в одном интегрированном корпусе. Два теплообменника (генератор и конденсатор) работают при более высоком давлении, и их назначение — получить практически в чистом виде легкокипящую жидкость, в данном случае — воду. Два других теплообменника (испаритель и абсорбер) работают при пониженном давлении. Их задачей является отвод тепловой энергии от источника и превращение полученного пара в компонент жидкого раствора. В ходе описанных превращений от абсорбера и конденсатора отводится теплота соответствующих процессов сорбции и конденсации, которая передаётся нагреваемому теплоносителю, например сетевой воде. При этом

в процессе эксплуатации установки требуется исключить переход температур хладагента через граничные значения, не допустимые для раствора воды в бромистом литии. Эти предельные значения температур теплоотдающего (утилизируемого) и тепловоспринимающего потоков и определяют допустимые температурные области, при которых возможна работа АБТН. Схема реального АБТН, естественно, несколько сложнее, что обусловлено требованиями эффективности и надёжности работы оборудования.

Целесообразность применения АБТН в системах теплоснабжения определяется сравнительно низким температурным потенциалом теплоносителя, применяемого для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Фактически его температура редко превышает 100 °С. Применение абсорбционных теплонасосных установок позволяет при наличии низкопотенциального теплоносителя с температурой от 15 до 60 °С получить теплоноситель с температурой до 80 °С с коэффициентом трансформации теплоты 1,65–1,75, а в двухступенчатых тепловых насосах — до 2,2 [2, 7].

Рассмотрим ряд конкретных технических решений по утилизации скрытой теплоты водяных паров дымовых газов применительно к отопительным котельным и мини-ТЭЦ на базе газопоршневых агрегатов (ГПА) с использованием поверхностных конденсационных экономайзеров и АБТН.

Вариант с установкой конденсационных поверхностных экономайзеров

Применение конденсационного поверхностного экономайзера на отопительной котельной особенно привлекательно в том случае, когда от неё непосредственно осуществляется горячее водоснабжение потребителей.

Принципиальная схема с дополнительным экономайзером представлена на рис. 1. КПД котлоагрегата в этом случае [3–7, 9], по нашим расчётам, увеличивается на 12 % и составит 104 %. При сложившемся режиме работы по фактическим данным котельной УП «Минсккоммунтеплосеть» по ул. Долгиновский тракт, 152 в отношении котлоагрегата ДКВР-10/13, работающего в водогрейном режиме, экономия природного газа составит до 392 тыс. т у.т./год. Простой срок окупаемости такого мероприятия зависит от времени использования номинальной мощности котлоагрегата и для 4000 часов в год не превышает двух лет.

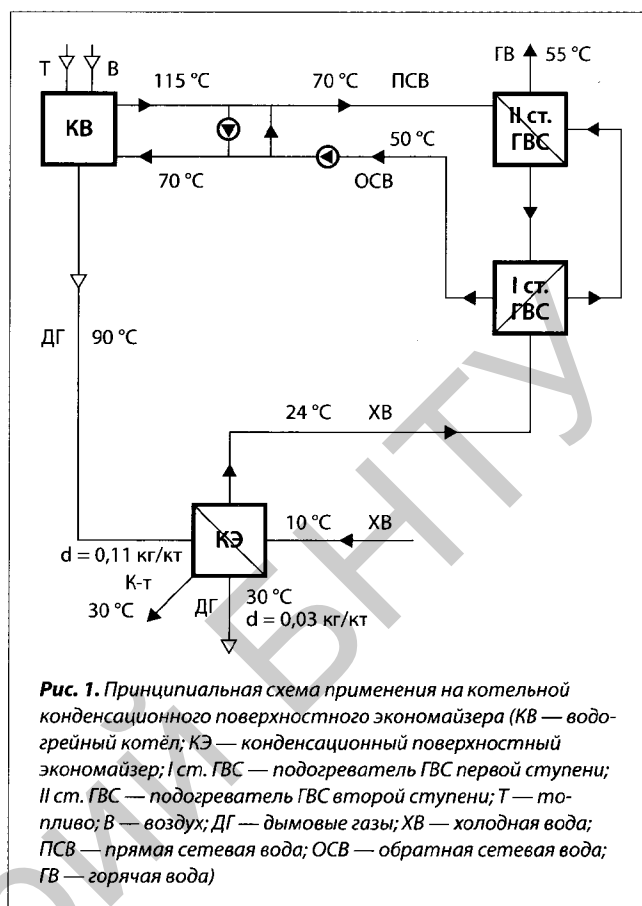


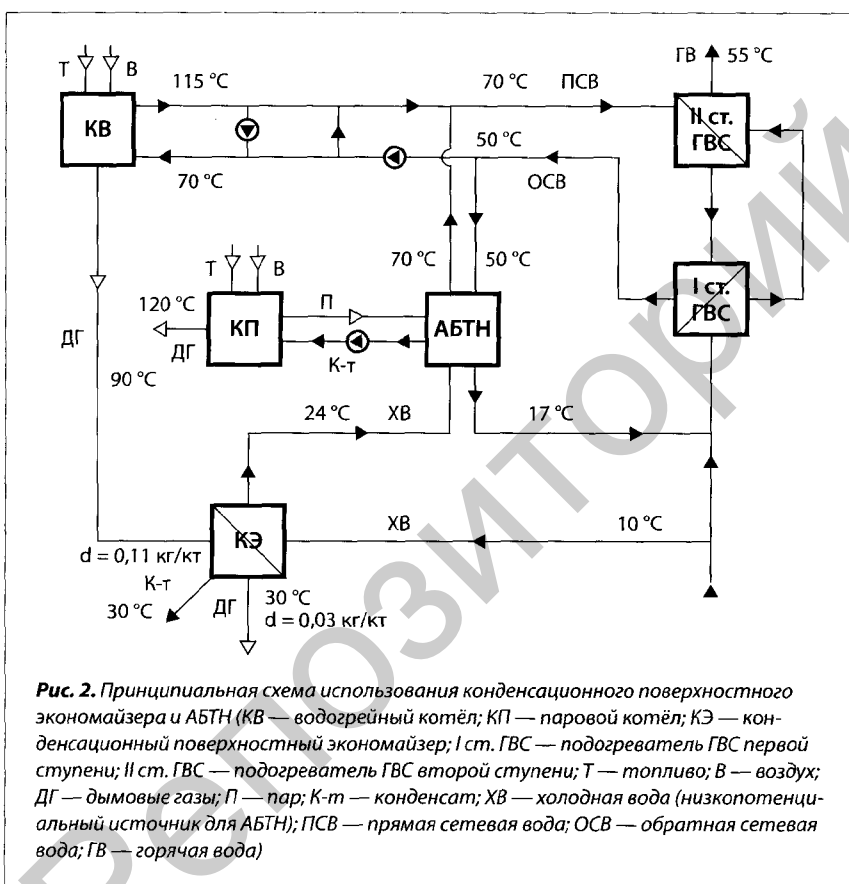
Рис. 1. Принципиальная схема применения на котельной конденсационного поверхностного экономайзера (КВ — водогрейный котёл; КЭ — конденсационный поверхностный экономайзер; I ст. ГВС — подогреватель ГВС первой ступени; II ст. ГВС — подогреватель ГВС второй ступени; Т — топливо; В — воздух; ДГ — дымовые газы; ХВ — холодная вода; ПСВ — прямая сетевая вода; ОСВ — обратная сетевая вода; ГВ — горячая вода)

Вариант совместного применения конденсационного поверхностного экономайзера и АБТН на водогрейной котельной, осуществляющей отпуск теплоносителя в тепловую сеть и непосредственно горячей воды потребителям

В этом варианте (принципиальная схема на рис. 2) конденсационный экономайзер используется для охлаждения дымовых газов ДГ, покидающих водогрейный котёл КВ, с 90 до 30 °С с конденсацией входящих в них водяных паров. Полученная теплота в результате охлаждения продуктов сгорания ниже точки росы в конденсационном поверхностном экономайзере КЭ идёт на нагрев холодной воды до температуры 24 °С. Эта вода далее используется в качестве низкопотенциального источника теплоты для АБТН. На выходе из АБТН вода имеет температуру 17 °С. Расчёты были выполнены по реальным данным котельной предприятия «Минсккоммунтеплосеть» применительно к котлоагрегату ДКВР-10/13, работающему в водогрейном режиме, совместно с паровым котлом Е-1/0,9-ГМ, предназначенным для покрытия собственных нужд котельной. В конденсационном поверхностном экономайзере КЭ в этом варианте теплосъём составляет 840 кВт.

Табл. 1. Основные показатели работы оборудования по варианту совместного применения конденсационного поверхностного экономайзера и АБТН на водогрейной котельной

Исходные данные		Результаты расчёта	
Средняя теплопроизводительность котла ДКВР-10/13 (70 % от номинальной), кВт	6350	Теплосъём с контактного поверхностного экономайзера, кВт	840
Теплотворная способность топлива, кДж/кг	45 880	Тепловая мощность АБТН, кВт	1080
Коэффициент избытка воздуха с учётом присосов для водогрейного котла	1,4	Коэффициент трансформации теплоты	1,64
Влагосодержание дымовых газов перед конденсационным экономайзером (КЭ), кг/кг с.г.	0,11	Тепловая мощность, поступающая в АБТН с охлаждающей водой, кВт	422
Максимальное давление пара, поступающего в АБТН, бар	5,25	Тепловая мощность потока пара, поступающего в АБТН, кВт	658
Расход пара от котла Е-1/0,9-ГМ, т/ч	1	Расход получаемой горячей воды в АБТН, т/ч	45,4
КПД котла ДКВР-10/13, %	92	КПД котла ДКВР-10/13 с учётом работы КЭ, %	104
КПД парового котла Е-1/0,9-ГМ, %	90		



ры. В табл. 1 приведены основные показатели работы оборудования, полученные в результате расчёта данного варианта использования КЭ и АБТН.

Анализ полученных результатов расчёта эффективности внедрения АБТН и конденсационного экономайзера на указанной котельной позволил определить основные технико-экономические показатели мероприятия. За счёт охлаждения дымовых газов и использования скрытой теплоты парообразования водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, экономится более 6 % топлива на котельной, при этом выдаваемая в тепловую сеть тепловая мощность увеличивается на 1 МВт. Однако ввиду режимных особенностей работы оборудования котельной УП «Минсккоммунтеплосеть» следует учитывать, что АБТН будет работать совместно с котлом ДКВР-10/13 только в отопитель-

ный период (при расчётах число часов работы принималось 4000 в год). Простой срок окупаемости внедряемого оборудования на котельной при таком режиме работы не превышает 6 лет. Следовательно, для котельных, имеющих непосредственный отпуск горячей воды от котельной, более эффективным мероприятием может быть установка только конденсационного поверхностного экономайзера. Выбор в пользу того или иного решения должен опреде-

Но в тепловом насосе (см. табл. 1) используется не весь теплосъём, а только его часть, определяемая исходя из максимального расхода пара (1 т/ч) парового котла КП. «Горячий» тепловой поток из АБТН составляет 1080 кВт в виде теплоносителя с температурой 70 °С и далее используется в теплообменниках I ст. и II ст. ГВС. Следует отметить, что схема снабжения потребителей горячей водой на котельной работает через тепловые аккумулято-

Табл. 2. Основные показатели работы оборудования по варианту применения теплового насоса и конденсационного экономайзера совместно с когенерационным ГПА

Исходные данные		Полученные данные	
Электрическая мощность ГПА, МВт	3	Теплосъём с конденсационного поверхностного экономайзера, кВт	470
Теплотворная способность топлива, МДж/кг	44,2	Тепловая мощность АБТН, кВт	1150
Коэффициент избытка воздуха для ГПА	1,8	Коэффициент трансформации тепла	1,72
Влагосодержание продуктов сгорания перед конденсационным экономайзером (КЭ), кг/кг с.г.	0,09	Расход получаемой горячей воды в АБТН, т/ч	39,6
Расход топлива в ГПА, м ³ /ч	745	Тепловая мощность сетевого подогревателя, МВт	2,6
Электрический КПД, %	43	Расход продуктов сгорания в АБТН, т/ч	7,9
Тепловой КПД, %	42,7	Тепловой КПД после модернизации, %	49,7
Коэффициент использования топлива, %	85,7	Коэффициент использования топлива после модернизации, %	92,7

ляется анализом нагрузок котельной и технико-экономическим расчётом.

Вариант использования АБТН и конденсационного поверхностного экономайзера совместно с ГПА

Технологическая схема представлена на рис. 3. Продукты сгорания ПС из ГПА с температурой 425 °С поступают в тепловой насос. Так как температура уходящих газов из АБТН достаточно велика и составляет 160–180 °С, устанавливается дополнительный теплообменник (экономайзер) Э, в котором дымовыми газами нагреваем теплоноситель, поступающий из охлаждающей системы ОД ГПА, до температуры 95 °С. Далее этот теплоноситель поступает в сетевой подогреватель СП. После экономайзера Э продукты сгорания поступают в конденсационной поверхностный экономайзер КЭ, где они доохлаждаются с конденсацией части находящихся в них водяных паров. Нагретая холодная вода ХВ с температурой 37 °С поступает в АБТН, где охладившись, возвращается обратно в КЭ, создавая тем самым замкнутый контур.

Были выполнены расчёты в отношении газопоршневого агрегата электрической мощностью 3 МВт. В табл. 2 приведены основные параметры, исходные и расчётные по данному варианту использования АБТН.

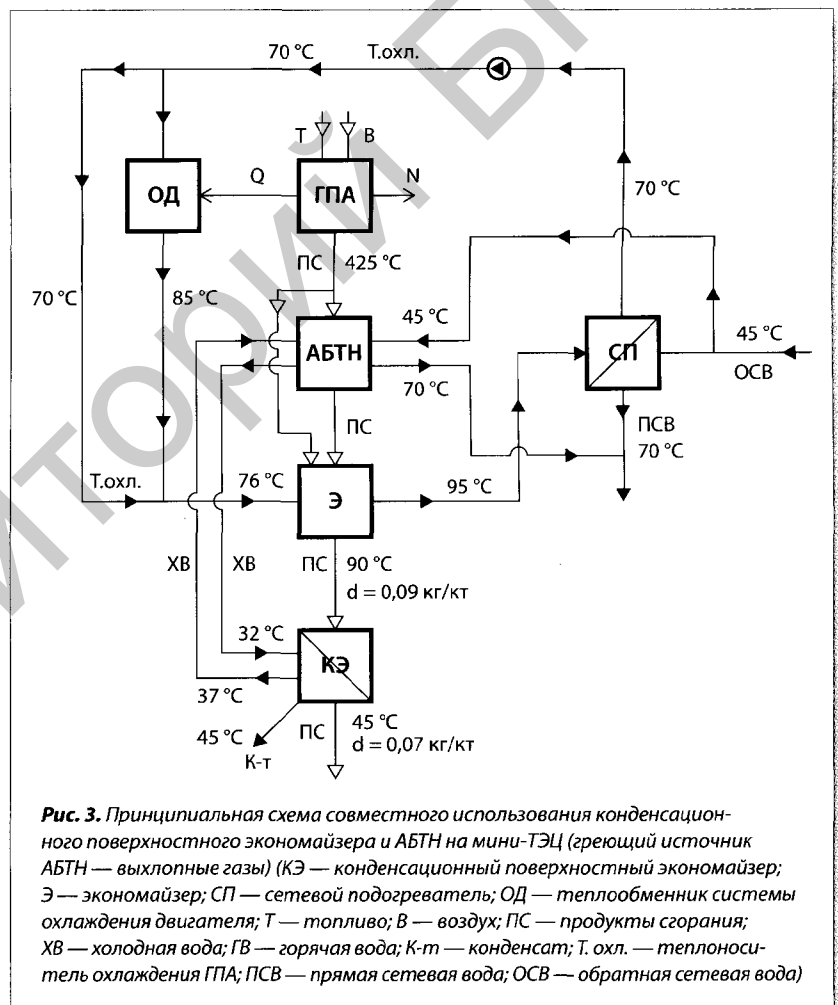


Рис. 3. Принципиальная схема совместного использования конденсационного поверхностного экономайзера и АБТН на мини-ТЭЦ (греющий источник АБТН — выхлопные газы) (КЭ — конденсационный поверхностный экономайзер; Э — экономайзер; СП — сетевой подогреватель; ОД — теплообменник системы охлаждения двигателя; Т — топливо; В — воздух; ПС — продукты сгорания; ХВ — холодная вода; ГВ — горячая вода; К-т — конденсат; Т.охл. — теплоноситель охлаждения ГПА; ПСВ — прямая сетевая вода; ОСВ — обратная сетевая вода)

Вариант использования АБТН и конденсационного поверхностного экономайзера совместно с когенерационным ГПА с применением в качестве греющего теплоносителя перегретой воды

Реализация варианта, рассмотренного выше, с применением в качестве греющего теплоносителя

Табл. 3. Основные показатели работы оборудования по варианту применения теплового насоса и конденсационного экономайзера совместно с ГПА для схемы на рис. 4

Исходные данные		Полученные данные	
Электрическая мощность ГПА, МВт	3	Теплосъём с контактного поверхностного экономайзера, кВт	470
Теплотворная способность топлива, МДж/кг	44,2	Тепловая мощность АБТН, кВт	1150
Коэффициент избытка воздуха для ГПА	1,8	Коэффициент трансформации теплоты	1,72
Влагосодержание продуктов сгорания перед конденсационным поверхностным экономайзером КЭ, кг/кг с.г.	0,09	Тепловая мощность сетевого подогревателя, МВт	2,6
Расход топлива в ГПА, м ³ /ч	745	Расход греющей горячей воды в АБТН, т/ч	58
Электрический КПД ГПА, %	43	Тепловая мощность дополнительного устанавливаемого экономайзера, МВт	1
Тепловой КПД, %	42,7	Тепловой КПД после модернизации, %	49,7
Коэффициент использования топлива, %	85,7	Коэффициент использования топлива после модернизации, %	92,7

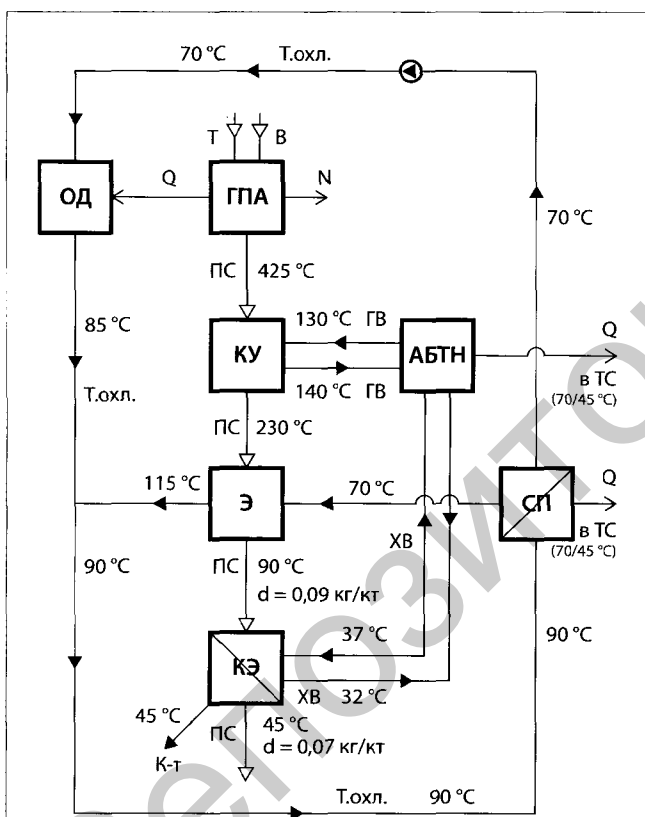


Рис. 4. Принципиальная схема совместного использования конденсационного поверхностного экономайзера и АБТН на мини-ТЭЦ (греющий источник АБТН — горячая вода) (КЭ — конденсационный поверхностный экономайзер; КУ — котёл-утилизатор; Э — экономайзер; СП — сетевой подогреватель; ОД — теплообменник системы охлаждения двигателя ГПА; ТС — тепловая сеть; Т — топливо; В — воздух; ПС — продукты сгорания; ХВ — холодная вода; ГВ — горячая вода; Т.охл. — теплоноситель охлаждения ГПА; К-т — конденсат)

нологическую схему комбинированной установки. В то же время в республике эксплуатируются когенерационные ГПА, в которых утилизация теплоты продуктов сгорания топлива осуществляется путём нагрева теплоносителя для систем теплоснабжения. Так как АБТН в качестве греющего источника могут использовать не только пар, выхлопные газы, а и горячую воду с температурой от 120 °С и выше, рассмотрим вариант использования АБТН с применением в качестве греющего теплоносителя перегретой воды (рис. 4).

Продукты сгорания ПС из ГПА поступают в котёл-утилизатор КУ, где нагревают воду до температуры 140 °С, которая в свою очередь в качестве греющего теплоносителя используется для АБТН. Так как в этом случае температура выхлопных газов после КУ возрастёт, то для её снижения перед конденсационным экономайзером по ходу дымовых газов, так же как и в предыдущем варианте, устанавливается дополнительный экономайзер Э, который используется для подогрева теплоносителя внутреннего контура ГПА, поступающего из сетевого подогревателя СП.

После экономайзера Э продукты сгорания поступают в конденсационный поверхностный экономайзер КЭ, где охлаждаются до температуры 45 °С с конденсацией части находящихся в них водяных паров. КЭ и АБТН имеют общий замкнутый контур: нагретая вода в газодыном теплообменнике (37 °С) поступает в АБТН, где, охладившись до 32 °С, возвращается обратно в КЭ. Расчётная тепловая мощность АБТН составляет 1150 кВт. Следует отметить, что тепловой насос, используя низкопотенциальный источник — воду с температурой 37 °С, может нагреть теплоноситель для тепловой сети выше температуры

продуктов сгорания позволяет на стадии проектирования отказаться от котла-утилизатора, так как продукты сгорания после газового двигателя поступают непосредственно в АБТН, тем самым упростить тех-

70 °С — до 85 °С. Основные результаты расчёта данной схемы приведены в табл. 3.

Сравнивая полученные значения для вариантов использования АБТН и конденсационного поверхностного экономайзера совместно с ГПА, можно заметить, что вид греющего теплоносителя для АБТН (горячая вода или продукты сгорания из ГПА) не окажет влияния на его тепловую мощность, а следовательно, и на экономические параметры эффективности схем.

Анализ данных, приведённых в табл. 1–3, показывает наличие оптимизационной задачи по определению уровня использования низкотемпературного потенциала дымовых газов. Так как с понижением температуры низкопотенциального источника уменьшается температура кипения в испарителе и давление в абсорбере, а также концентрация крепкого раствора, то увеличивается кратность циркуляции раствора в АБТН и, соответственно, уменьшится тепловой коэффициент теплотрансформатора. Следовательно, тепловая мощность АБТН зависит от теплосъёма в конденсационном поверхностном экономайзере и от температуры уходящих газов после КЭ или от температуры поступающей холодной воды. Чрезмерно низкая температура нагреваемой воды в КЭ, увеличивая теплосъём в конденсационном экономайзере, уменьшает тепловую мощность АБТН.

Очевидно, что применение предлагаемых схем приводит к некоторому увеличению затрат на дымовую трубу и газоходы после конденсационного экономайзера и росту аэродинамического сопротивления газового тракта.

Следует также отметить, что удельная стоимость АБТН сильно зависит от единичной мощности агрегатов. Так, при тепловой мощности 1 МВт удельная стоимость (у.е./кВт) составляет около 170, при 5 МВт — до 100 и при 15 МВт — 70, то есть при возрастании мощности утилизируемого низкопотенциального теплового потока свыше 5 МВт простой срок окупаемости мероприятия может снизиться примерно в полтора раза и будет составлять около 4 лет.

Выводы

Использование низкотемпературного потенциала дымовых газов котельных и когенерационных газопоршневых мини-ТЭЦ путём совместного применения абсорбционных тепловых насосов и конденсационных поверхностных экономайзеров является одним из перспективных мероприятий для повы-

шения эффективности теплоисточников и снижения себестоимости вырабатываемой тепловой энергии. Повышение коэффициента использования топлива может составить от 4 до 12 %. В то же время обратим внимание, что для котельных, имеющих непосредственный отпуск горячей воды от котельной, экономически более эффективным мероприятием может быть установка только конденсационных поверхностных экономайзеров.

Выбор схемы утилизации и эффективность мероприятия зависят от режимов работы энергетического оборудования, графика тепловой нагрузки, коэффициента использования номинальной мощности установленного оборудования и требуют проведения индивидуального технико-экономического расчёта. Возможность применения тепловых насосов более высокой единичной мощности позволяет значительно сократить срок окупаемости дополнительных капитальных затрат.

ВМ

Литература

1. Данилов, Н. И. Основы энергосбережения: учебник / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 564 с.
2. Хрусталёв, Б. М. К вопросу о развитии систем теплоснабжения в Беларуси. Взгляд в ближайшее будущее и обозримую перспективу / Б. М. Хрусталёв, В. Н. Романюк, Т. В. Бубыр // Энергия и Менеджмент. — № 4–5. — 2014. — С. 2–7.
3. Молочко, А. Ф. Об эффективности теплонасосных установок (ТНУ) / А. Ф. Молочко // Энергоэффективность. — 2009. — № 2. — С. 22–24.
4. Кибрик, П. С. Эксплуатация котельных установок небольшой производительности / П. С. Кибрик, Г. Р. Либерман. — М.: Энергия, 1969. — 360 с.
5. Григорьев, В. Г. Утилизация низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов на химических предприятиях / В. Г. Григорьев, В. К. Нейман, С. Д. Чураков и др. — М.: Химия, 1987. — С. 240.
6. Аронов, И. З. Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных / И. З. Аронов. — М.: Энергия, 1967. — 192 с.
7. Соснин, Ю. П. Контактные водонагреватели / Ю. П. Соснин. — М.: Стройиздат, 1974. — С. 359.
8. Блиер, Б. М. Теоретические основы проектирования абсорбционных термотрансформаторов / Б. М. Блиер, А. В. Вургафт. — М.: Пищевая промышленность, 1971. — 203 с.
9. Роддатис, К. Ф., Полтарецкий, А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности / К. Ф. Роддатис, А. Н. Полтарецкий. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 488 с.