

Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы: энергосбережение, малая и средняя энергетика, ЖКХ. Новые решения

**Сообщение на III-й Отраслевой научно-практической конференции
по тепловым насосам «Тепловые насосы большой мощности:
внедрение и эксплуатация»**

2–5 февраля 2016 года

Е.Г. ШАДЕК, к.т.н., сотрудник ОИВТ РАН

Представлены авторские разработки по трём направлениям. Основное содержание работ опубликовано в статьях, «ноу-хау» защищены заявками в Роспатент. Эффективность решений — в использовании абсорбционного бромистолитиевого теплового насоса (**АБТН**) одновременно как источника холода ($25/30 \pm 3$ °С) для охлаждения продуктов сгорания (**ПС**) ниже точки росы $t_{\text{росы}}$ (для продуктов сгорания **природного газа** $t_{\text{росы}} = 50\text{--}55$ °С) и глубокой утилизации (**ГУ**) их тепла и как генератора тепла в коммунальном теплоснабжении ($60/90$ °С) с коэффициентом преобразования 1,65–1,73 (то есть **АБТН** в 1,65–1,73 раза эффективнее обычного топливного котла). Энергоносители: пар 0,4–0,6 МПа; горячая вода не ниже 140 °С; дымовые газы от 400 °С; огневой (газовый) обогрев. Выбор **АБТН** однозначен ввиду явных преимуществ перед парокон- прессионными теплонасосными установками (ТНУ) (в данных условиях).

1. Система глубокой утилизации тепла продуктов сгорания

Область применения — стационарные энергетические и промышленные, а также крупные водогрейные котлы (пиковые или утилизационные, например, в составе парогазовых установок) большой мощности (Q_k от 30 Гкал/ч) и с высокой и стабильной нагрузкой — коэффициент использования мощности (**КИМ**) составляет от 0,7. Узел **ГУ** — конденсационный теплообменник-утилизатор (**КТУ**) в газоходе непосредственно за котлом (рис. 1а) либо конденсационный экономайзер (**КЭ**) — последняя по ходу газов секция хвостовых поверхностей в конвективной шахте котла (рис. 1б). Узел оборудуется системой сбора, отведения и обработки (декарбонизация, дегазации — но не всегда) конденсата. В обоих вариантах, как правило, требуется байпасирование (в холодное время года). Теплообменник **ГУ** включён в замкнутый контур испарителя **АБТН**, а теплоотводящий (для потребителя — греющий) контур «*абсорбер (А) — конденсатор (К)*» — в тепловую сеть с котлом.

Схема позволяет реализовать любой возможный режим: **а)** штатный — с **АБТН** и узлом **ГУ**; **б)** с догревом воды из контура **А–К** в котле; **в)** без догрева, с подачей сетевой воды потребителю из контура **А–К**; **г)** без **АБТН**, с подачей в узел **ГУ** обратной холодной воды, когда её температура ниже $t_{росы}$ (**АБТН** отключается).

Система обеспечивает: **а)** КПД котла 105–107% (по низшей теплотворности $Q_{рн}$); **б)** удельный расход топлива порядка 133 кг у.т./Гкал; экономию топлива от 12 до 20% в зависимости от КПД замещаемого котла. Количество утилизируемого тепла $Q_{ут}$ при **ГУ** ($Q_{ут}$ равно холодильной мощности **АБТН** $Q_{хол}$) — 10–12% от Q_k .

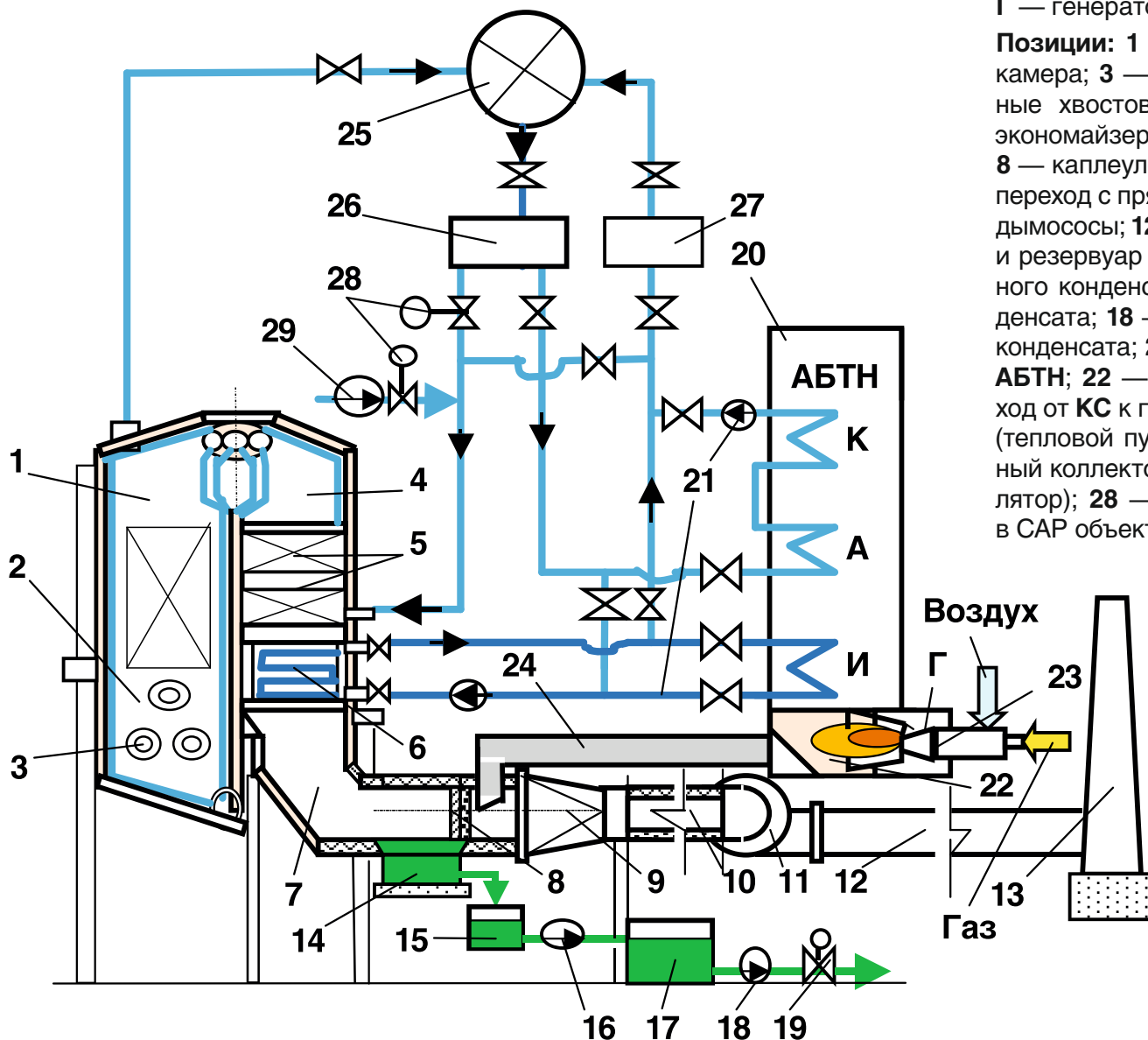
ГУ исключает конденсацию в газовом тракте («плачущие» котлы), снижается его износ; отпадает надобность в рециркуляционной насосной установке (экономию электроэнергии); благодаря орошению **ПС** капельной влагой резко уменьшаются вредные выбросы (окислы NO_x), вплоть до получения экологически безопасного процесса. Вырабатывается большое количество избыточной влаги, отпадает потребность в подпиточной воде. На Западе отопительные конденсационные котлы получили массовое применение. В России, где температура обратной сетевой воды как правило выше точки росы, глубокая утилизация возможно только с помощью теплового насоса.

Оценочно для $Q_{ут} = Q_{хол} = 4$ МВт (машина **АБТН-4000** «Теплосибмаш») — при значении **КИМ** котла $M = 0,8$ и КПД замещённого котла 0,9 — экономия за год составит около 3,3 млн м³ газа и при его цене 5 руб/м³ — более 16 млн руб. Реализация всего проекта системы **ГУ** (**ТЗ, ТЭО, ПИР, СМР, ПНР**, оборудование, **САР** и пр.) — порядка 32 млн руб.

Срок окупаемости — около двух лет.

Реализация проектов откроет перспективы создания отечественного конденсационного стационарного котла (наиболее рациональный вариант — с конденсационным экономайзером), тиражирования и масштабной модернизации котлов и котельных при проектировании новых и реконструкции действующих, внедрения систем на большом числе объектов.

Рис. 1а. Система глубокой утилизации тепла продуктов сгорания котлов на базе теплового насоса



Узлы АБТН: К — конденсатор, А — абсорбер, И — испаритель, Г — генератор.

Позиции: 1 — котел водогрейный (типа ПТВМ); 2 — топочная камера; 3 — горелки; 4 — конвективная шахта; 5 — конвективные хвостовые поверхности нагрева; 6 — конденсационный экономайзер — теплообменник-утилизатор (КТУ); 7 — газоход; 8 — каплеуловитель (сетки, жалюзи, фильтры); 9 — конфузор — переход с прямоугольного сечения газохода на круглое; 10 и 11 — дымососы; 12 — газовый тракт; 13 — дымовая труба; 14 — поддон и резервуар для слива и сбора конденсата; 15 — бак загрязнённого конденсата; 16 — дренажный насос; 17 — бак запаса конденсата; 18 — конденсационный насос; 19 — регулятор расхода конденсата; 20 — АБТН; 21 — циркуляционные насосы контуров АБТН; 22 — камера сгорания (КС); 23 — горелка; 24 — дымоход от КС к газоходу котла; 25 — потребитель тепловой нагрузки (тепловой пункт, теплосеть, отопление, ГВС и пр.); 26 — обратный коллектор; 27 — прямой (подающий) коллектор (бак-аккумулятор); 28 — запорно-регулирующие органы (интегрированные в САР объекта); 29 — линия подпитки с подпиточным насосом.

Обозначения:






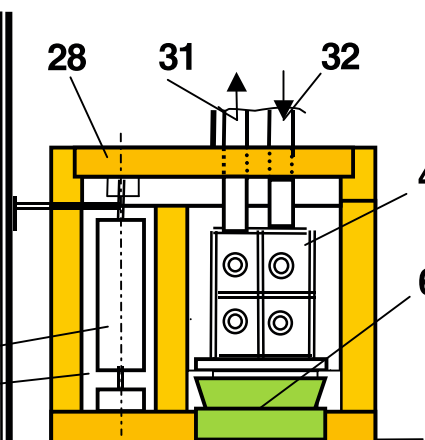
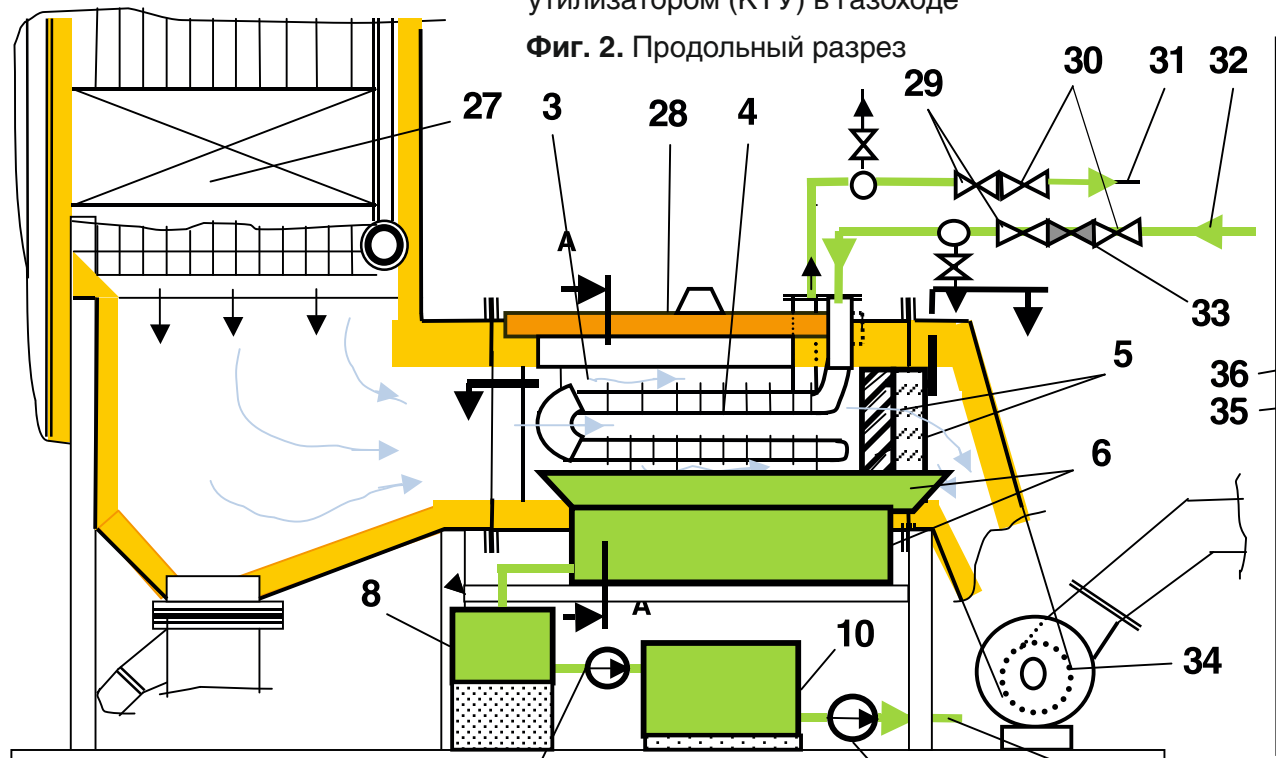
-  Циркуляционная вода
-  Футеровка
-  Изоляция газохода
-  Продукты сгорания
-  Конденсат продуктов сгорания и дутьевого воздуха

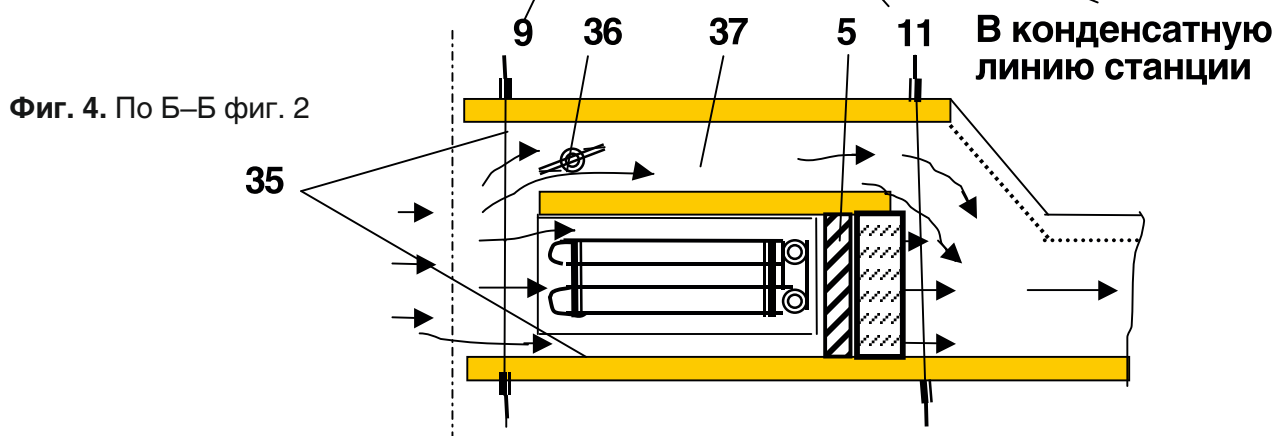
Рис. 16. Система глубокой утилизации тепла продуктов сгорания котлов. КТУ в газоходе

Фиг. 2–4. Котёл с конденсационным теплообменником-утилизатором (КТУ) в газоходе

Фиг. 2. Продольный разрез



Фиг. 3. По А-А фиг. 2



Фиг. 4. По Б-Б фиг. 2

Позиции: 27 — хвостовая часть котла; 28 — перекрытие камеры — съёмная крышка; 29 — предохранительный клапан; 30 — запорный вентиль; 31 и 32 — обратная и прямая линии КТУ; 33 — обратный клапан; 34 — дымосос; 35 — камера для размещения узла глубокой утилизации тепла продуктов сгорания; 36 — регулировочный дроссель-клапан (заслонка) с приводом; 37 — байпасный канал; остальные обозначения на рис. 1.

2. Мини-ТЭЦ в контуре ORC-модуля с тепловым насосом

Предложение относится к малой и средней энергетике, в особенности к децентрализованной, к энергокомплексам, генерирующим электроэнергию по органическому циклу Ренкина (**ORC**-цикл) на низкокипящих энергоносителях (**НКЭ**), а тепловую — с помощью тепловых насосов. Система включает котёл (термомасляный или водогрейный с нагревом до 140–150 °С); парогенератор **НКЭ** — кожухотрубный теплообменник; **АБТН**, генератор которого включён в контур котла, а испаритель — в контур конденсатора **ORC**-модуля; конденсационный теплообменник-утилизатор (**КТУ**) в газоходе котла (или **КЭ** в составе котла). Котёл включён параллельно в два замкнутых контура, в которых циркулирует греющий теплоноситель — масло или вода: первый контур «котёл — генератор **АБТН**», второй контур «котёл — трубная система парогенератора». Конденсат **НКЭ** из конденсатора направляют в трубную систему **КТУ**, нагретый конденсат подают в межтрубное пространство парогенератора, а оттуда полученный отсепарированный в сепараторе пар направляют в турбину (**рис. 3**).

Решение позволяет реализовать различные варианты: режимы, конфигурации схемы, выбрать тип котла (твердотопливный, многотопливный термомасляный, с нагревом до 300 °С для **НКЭ** с повышенными рабочими температурами, например, терминола; или водогрейный до 150 °С для пентана, бутана и т.п.) и топливо — в принципе, любое, в том числе древесные отходы (**ДО**). Предусматривается байпасирование отдельных элементов схемы, например, **КТУ** (в зимнее время). Расширяются возможности регулирования, оптимизации процесса. Показана расчётная модель объекта — мини-ТЭЦ с термомасляным котлом на базе **ORC**-модуля фирмы Turboden 10HR, Therminol 66, тепловой мощностью 5,54 МВт, холодильной — 4,4 МВт. Для модуля выбран **АБТН-4000В** на горячей воде «Теплосибмаш», который хорошо вписывается в контур. Расчётная температура уходящих газов — 103 °С. В результате глубокой утилизации сэкономлено 1,4 МВт тепла, применения **АБТН** — 4 МВт (его холодильная мощность). Общее количество утилизованного тепла $Q_{ут} = 5,4$ МВт. Экономия только на тепле (топливе, **ДО**) составит около 15 млн руб. в год. Получены диапазоны параметров (температурный напор 28,5–36,0 °С, поверхность нагрева $F = 370–490$ м²) и оптимальные режимы — с минимальными значениями F и максимальными $Q_{ут}$.

Конкурентные преимущества применяемых технологий — глубокой утилизации (**ГУ**) и теплового насоса (**АБТН**) — в сочетании обеспечивают низкую себестоимость отпускаемых тепла и электричества, рентабельность проекта. Уменьшение температуры газовых выбросов и присутствие в них водяных паров нейтрализуют вредное воздействие оксидов азота, делает процесс экологически чистым. Охлаждение конденсатора в контуре испарителя **АБТН** вместо воздушных охладителей экономит капитальные и эксплуатационные затраты, производственные площади и пр., оно надёжнее и стабильнее, и не зависит от погодных условий, а работа ТЭЦ в целом — эффективнее, экономичнее.

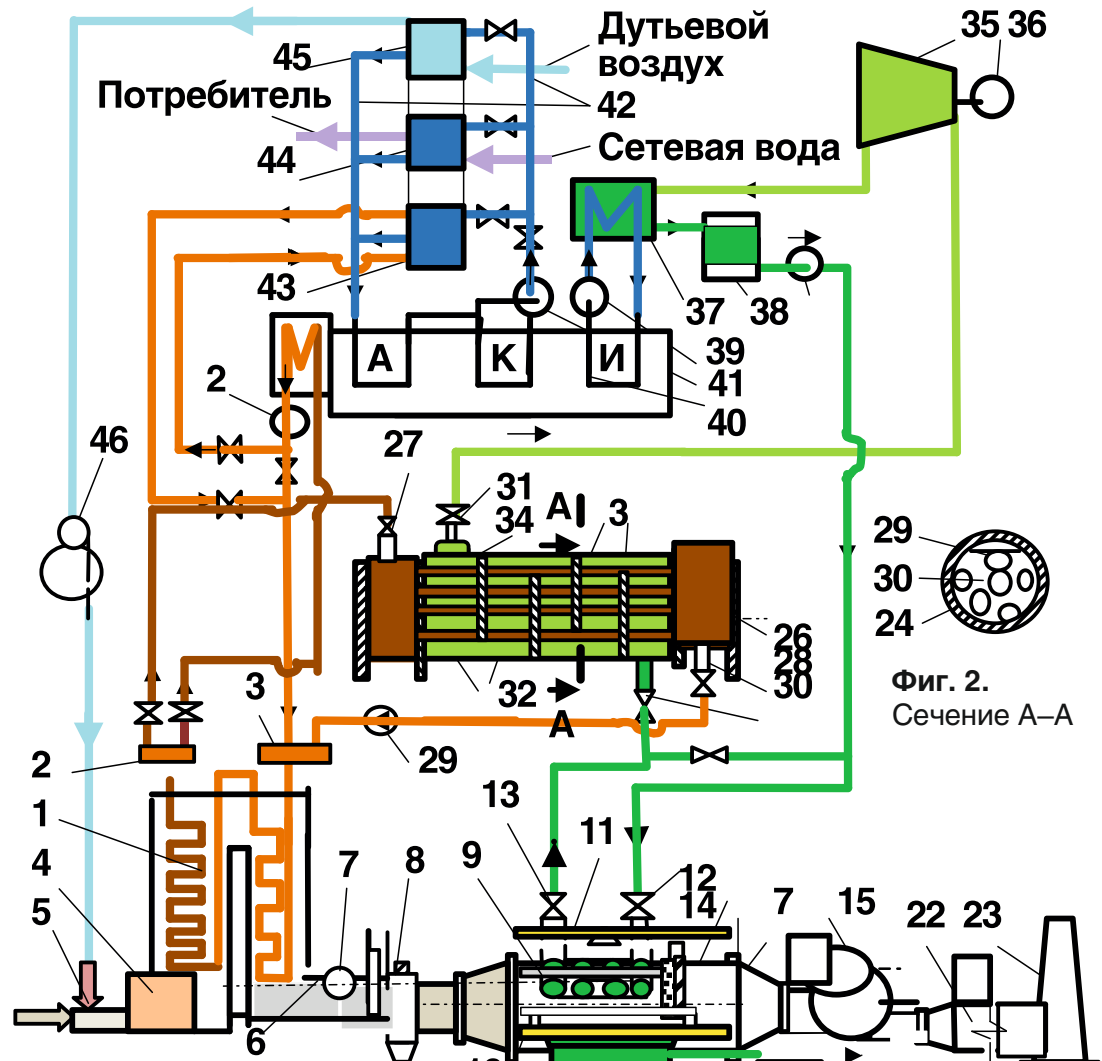
Применение **ORC**-модуля расширяет возможности и границы утилизации, позволяет утилизировать среднепотенциальное тепло продуктов сгорания. Особенно перспективно использование мини-ТЭЦ как автономного независимого надёжного и экономичного источника энергоснабжения на различном, в том числе местном, топливе вообще, и особенно для удалённых труднодоступных объектов (предприятий, населённых пунктов, посёлков и т.п.), что крайне актуально для России.

Рис. 2. Мини-ТЭЦ в контуре ОРС-модуля с ТН

Элементы АБТН: Г — генератор, А — абсорбер, К — конденсатор, И — испаритель.

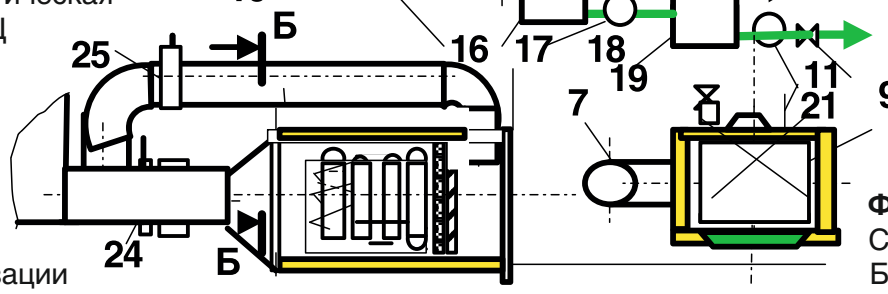
Позиции: 1 — многопливный (термомасляный) котёл; 2 и 3 — прямой и обратный коллекторы греющего теплоносителя (ГТ); 4 — узел сжигания топлива; 5 — узел подачи топлива; 6 — главный газоход; 7 — байпас; 8 — фильтр очистки дымовых газов; 9 — конденсационный теплообменник (КТ), узел глубокой утилизации (ГУ), трубная система; 10 — корпус узла ГУ; 11 — крышка корпуса; 12 и 13 — входной и выходной патрубки НКЭ; 14 — каплеуловитель; 15 — дымосос; 16 — поддон и резервуар конденсата водяных паров продуктов сгорания (ПС); 17 и 19 — баки загрязнённого и бак запаса конденсата; 18 и 20 — дренажный и конденсатный насосы; 21 — регулятор расхода; 22 — газовый тракт; 23 — дымовая труба; 24 и 25 — шибера в главном газоходе и байпасе; 26 — парогенератор НКЭ; 27 и 28 — входной и выходной патрубки ГТ; 29 — циркуляционные насосы в контурах ГТ; 30 и 31 — входной и выходной патрубки НКЭ парогенератора; 32 — трубная система парогенератора; 33 — трубные доски; 34 — сепаратор; 35 — турбина на НКЭ ОРС-модуля; 36 — электрогенератор; 37 — конденсатор модуля; 38 — бак конденсата НКЭ; 39 — конденсатный насос; 40 — АБТН; 41 — циркуляционные насосы контуров АБТН; 42 — тепловыделяющий (греющий) контур АБТН; 43–45 — теплообменники нагрева ГТ, сетевой воды и дутьевого воздуха, соответственно; 46 — дутьевой вентилятор

Фиг. 2. Сечение А-А



Фиг. 1. Технологическая схема мини-ТЭЦ

Фиг. 3. В плане. Байпас узла глубокой утилизации



Фиг. 4. Сечение Б-Б

Обозначения:

- Дутьевой воздух
- Греющий теплоноситель (масло — 300 °С; вода — 150 °С)
- Энергоноситель, НКЭ: конденсат, пар
- Циркуляционная вода в контурах АБТН
- Сетевая вода (из теплосети)

3. Комбинированная парогазовая установка на базе трансформатора тепла с инъекцией пара в газовый тракт

Решение совмещает лучшие показатели: **а)** ПГУ бинарного типа (высокие КПД и тепловую экономичность, электрическую и тепловую мощности) и **б)** цикла **STIG** со впрыском пара в газовый тракт (высокие мощности, паровое охлаждение проточной части газовой турбины, экологическую чистоту; исключается потеря воды с энергетическим паром) — **рис. 2**.

В отличие от известной установки «Водолей» (предприятие «Машпроект», город Николаев, Украина, 1980–1995 годы), охлаждение и конденсацию парогазовой смеси (**ПГС**) осуществляют в поверхностном теплообменнике-конденсаторе (**ПТК**), установленном за котлом, на стыке с газоходом, и включённом в замкнутый контур испарителя одноступенчатого абсорбционного бромистолитиевого трансформатора тепла (**АБТТ**). Создаётся замкнутый водопарогазовый контур с минимальными потерями тепла и воды вовне. В летний период включают внешний теплоотводящий контур **АБТТ** «конденсатор (**К**) — абсорбер (**А**) — градирня» (или конденсатор другого типа, например, вентиляторный, воздушный) и настраивают **АБТТ** на работу в режиме холодильной машины (**АБХМ**) с температурами воды 12/7 °С и температурами воды в контуре **К–А** 28/36 ± 3 °С (вход/выход). В зимний период в течение отопительного сезона включают контур **К–А** с автономными теплообменниками в нём для нагрева (в общем случае) конденсата, сетевой воды и дутьевого воздуха и настраивают **АБТТ** на работу в режиме теплового насоса (**АБТН**) с температурами воды-хладоносителя в контуре испарителя 30/25 ± 3 °С и температурами охлаждающей воды в контуре **К–А** в пределах 30–60/60–90 °С (вход/выход). Настройки всюду — в штатных диапазонах параметров машин.

Преимущества данного решения по сравнению с лучшими и ближайшими аналогами и прототипом (ПГУ МЭС-60 типа «Водолей»): **а)** снижение (почти на два порядка) расхода энергии на собственные нужды; утилизация тепла **ПГС** в зимний период; **б)** уменьшение эксплуатационных и капитальных затрат на обработку циркулирующей воды, обслуживание оборудования и пр. Благодаря этим преимуществам ожидаемый КПД заявленной установки превысит расчётный КПД прототипа и лучших аналогов 45–50% на 2–4% и составит 47–54%. Прирост КПД даст соответствующее повышение мощности или снижение расхода топлива. Область применения — ПГУ малой и средней мощности с внешней тепловой нагрузкой в зимний период при температуре теплоносителя до 90 °С. В случае наличия избыточного тепла в контуре **К–А** оно сбрасывается в градирню или воздушный конденсатор. Для расчётного примера, то есть предлагаемой установки общей мощностью 32 МВт (20 МВт — ГТУ и 12 МВт — ПТУ) холодильная мощность **АБТТ** составит $Q_{\text{хол}} = 4$ МВт, ожидаемая общая годовая экономия — около 42 млн руб. в год. Дополнительная экономия по сравнению с прототипом от снижения расхода электроэнергии на собственные нужды около 69 млн руб. Окупаемость реконструкции действующей ПГУ около двух лет. При этом обеспечиваются экологическая чистота процесса, экономия текущих затрат и др. Технологии реализуется на стадии проектирования, при разработке технических заданий (**ТЗ**) и технико-экономических обоснований (**ТЭО**) новых и реконструкции существующих энергообъектов.

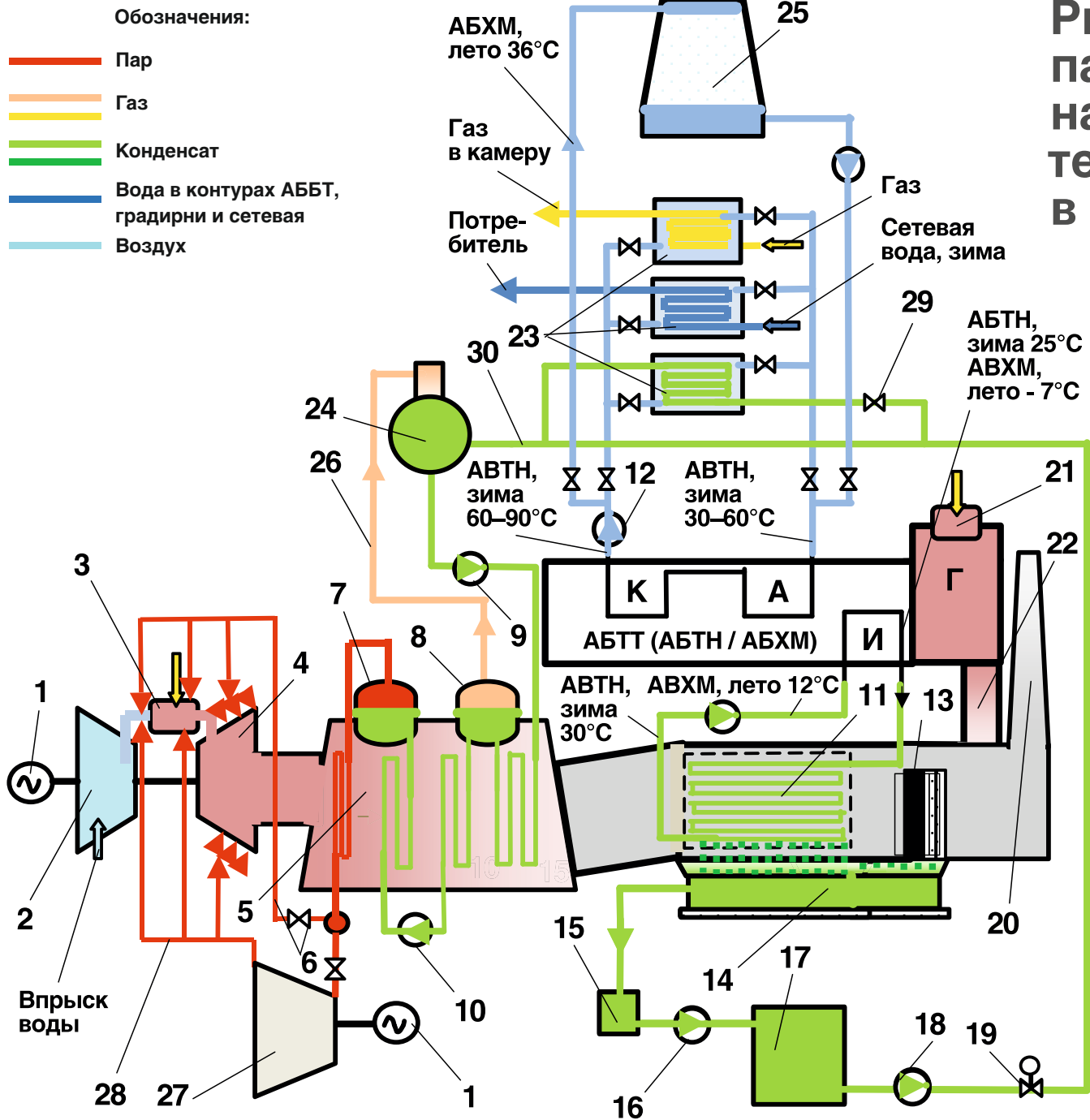


Рис. 3. Комбинированная парогазовая установка на базе трансформатора тепла со впрыском пара в газовый тракт

Элементы АБТТ [теплого насоса (АБТН) или холодильной машины (АБХМ)]: К — конденсатор, А — абсорбер, И — испаритель, Г — генератор.

Позиции: 1 — электрогенератор; 2 — многоступенчатый компрессор; 3 — камера сгорания (КС); 4 — газовая турбина; 5 — паровой котёл-утилизатор; 6 — трубопровод пара на впрыск в газовый тракт; 7 и 8 — барабаны высокого (ВД) и низкого (НД) давления; 9 и 10 — питательные насосы; 11 — теплообменник-конденсатор; 12 — насосы в циркуляционных контурах АБТТ; 13 — каплеуловитель (сепарационный блок); 14 — поддон и бак слива конденсата; 15 — бак грязного конденсата; 16 — дренажный насос; 17 — бак запаса конденсата; 18 — конденсатный насос; 19 — регулятор расхода конденсата; 20 — дымовая труба; 21 — горелка генератора АБТТ; 22 — газоход от КС в газовый тракт; 23 — теплообменники внешнего контура АБТТ; 24 — деаэратор; 25 — градирня или воздушный конденсатор; 26 — линия пара низкого давления от барабана к деаэратору; 27 — паровая турбина; 28 — трубопровод пара от паровой турбины на впрыск; 29 — запорно-регулирующая арматура; 30 — байпасная линия конденсата.

Заключение

Целесообразная форма разработки предложенных решений на первом этапе — выполнение НИОКР. Начальный и обязательный раздел работ — выбор объектов для разработки пилотных проектов, выбор направления (одного или нескольких).

Цель работы: предпроектная проработка пилотных проектов, проведение технико-экономических и финансово-коммерческих расчётов, экспертиза результатов. Принятие с их учётом решений о дальнейших работах.

Предполагаемое содержание: составление технического задания (ТЗ) и технико-экономического обоснования (ТЭО), расчёт и предварительный выбор оборудования, расчёт технико-экономических планов (ТЭП), финансово-экономический расчёт, схемные решения.

Результаты: выводы, рекомендации. Оценка эффективности и перспектив проекта и возможностей его тиражирования.