

Руководство для инженеров

Абсорбционные тепловые насосы Thermax Проектирование и обвязка

Тепло из сбросного тепла, тип 1 и тип 2:
подбор, расчёты, источники, схемы включения, обвязка,
автоматика, нормы



Содержание

Введение	6
1. Когда АБТН имеет смысл	7
2. Устройство и типы машин Thermax	14
3. Исходные данные	21
4. Расчёты с примерами	27
5. Требования к источнику тепла	37
6. Схемы включения	42
7. Обязка	49
8. Автоматика и режимы	53
9. Российские нормы	59
10. Самопроверка	62
11. Наши объекты	66
Словарь терминов	68
Список литературы	69

Список рисунков

Рисунок 1	Тепловой насос первого типа: 1 кВт дорогого тепла и 0,7 кВт бросового дают 1,7 кВт горячей воды	7
Рисунок 2	Куда достаёт какая машина: бросовое тепло, серийный электрический тепловой насос, АБТН первого и второго типа	9
Рисунок 3	Сколько тепла даёт 1 кВт топлива или пара: котёл, термотрансформатор, одноступенчатый и двухступенчатый тепловой насос	11
Рисунок 4	Цикл теплового насоса первого типа: бросовое тепло входит в испаритель, нагреваемая вода проходит абсорбер и конденсатор	15
Рисунок 5	Цикл термотрансформатора: испаритель и абсорбер на высоком давлении, генератор и конденсатор на низком	16
Рисунок 6	Рабочая область: чем больше подъём, тем крепче раствор и ближе линия кристаллизации	17
Рисунок 7	Машина Thermax Heat Pump Chiller: одна установка для холода и тепла	18
Рисунок 8	Chiller-heater: летний и зимний маршруты потоков одной машины	19
Рисунок 9	Четыре группы данных для подбора: нет данных хотя бы по одной — подбор не запускают	21
Рисунок 10	Считают месяцы, когда есть и источник, и потребитель, а не установленную мощность	24
Рисунок 11	Тепловой баланс: по каждому из трёх потоков измеряют расход и две температуры	27
Рисунок 12	Подъём одной ступени ограничен: «из 30 сразу 120» не получится	29
Рисунок 13	Светлогорский ЦКК: одинаковые температуры, разный масштаб, баланс сходится у обеих машин	33
Рисунок 14	Что проверять в присланной спецификации	35
Рисунок 15	Порядок проверки присланной спецификации	36
Рисунок 16	Где на площадке лежит бросовое тепло: слева — низкопотенциальные источники для испарителя, в середине — высокопотенциальная греющая среда для генератора	37
Рисунок 17	Базовая схема включения АБТН первого типа: источник через грязевик и насос, греющая среда в генератор, продукт потребителю, градирня — резервный сброс	42
Рисунок 18	Термотрансформатор (тип 2): внешней греющей среды нет, половина тепла поднимается выше исходной температуры, половина уходит в градирню	45
Рисунок 19	Каскад: последовательно по продукту (А) или с общим источником (Б)	46
Рисунок 20	Компоновка: с одного торца — свободная полоса под вытяжку трубок длиной с машину, вдоль — зона трубопроводов и проход обслуживания со щитом	51
Рисунок 21	После аварийного события первый шаг всегда один — снять подвод тепла; дальше порядок зависит от того, успела ли машина пройти разбавление	54
Рисунок 22	Линия кристаллизации раствора LiBr: в режиме тепла рабочая точка ближе к ней, чем в режиме холода	55
Рисунок 23	Абсорбционный тепловой насос Thermax на станции тепловых насосов Светлогорского ЦКК	66

Список таблиц

Таблица 1	Два типа машин	8
Таблица 2	Где проходит граница с электрическим тепловым насосом	9
Таблица 3	Разобранный расчёт: шаги	10
Таблица 4	Таблица выбора	12
Таблица 5	Чем АБТН отличается от АБХМ	14
Таблица 6	Разобранный расчёт: шаги	15
Таблица 7	Рабочая область и температурный подъём	17
Таблица 8	Исполнения по греющему источнику	18
Таблица 9	Машина «холод + тепло»: одна машина на два сезона	19
Таблица 10	Схемы chiller-heater по пару и результату	19
Таблица 11	Сводная таблица типов	20
Таблица 12	Контур машины	21
Таблица 13	Греющая среда	22
Таблица 14	Опросный лист	24
Таблица 15	Чем оборачиваются ошибки в данных	25
Таблица 16	Тепловой баланс машины первого типа	28
Таблица 17	Температурный подъём и его пределы	29
Таблица 18	Температура кристаллизации раствора по концентрации	30
Таблица 19	$T_{\text{греющ}} \geq 2 \times T_{\text{гв.вых}} - T_{\text{ист.вых}} + 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$	30
Таблица 20	Расходы по контурам	31
Таблица 21	Годовая экономия в энергии и условном топливе	32
Таблица 22	Разобранные расчёты	33
Таблица 23	Разобранный расчёт: шаги	34
Таблица 24	Проверка чужого расчёта и спецификации	35
Таблица 25	Какие источники подходят	37
Таблица 26	Пять параметров источника	38
Таблица 27	Замер источника: минимальная программа	39
Таблица 28	Если источник «пропадает»	40
Таблица 29	Тепловая сеть, ТЭЦ и котельная	43
Таблица 30	Годовой эффект по мощности машины	44
Таблица 31	Дерево выбора конфигурации	47
Таблица 32	Сравнение схем	48
Таблица 33	Узлы, которые отличают АБТН	51
Таблица 34	Пуск, останов и разбавительный цикл	53
Таблица 35	Защиты	55
Таблица 36	Сигналы в диспетчерскую	57
Таблица 37	Что специфично для АБТН	60
Таблица 38	Состав проекта	60

Таблица 39	Типичные ошибки проекта АБТН	62
Таблица 40	Коридоры для быстрой проверки расчёта	63
Таблица 41	Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат, Беларусь	66
Таблица 42	Объекты Thermax в мире	67

К ЧИТАТЕЛЮ

Дорогие коллеги! Это руководство. Он объясняет, как абсорбционный тепловой насос превращает сбросное тепло в полезное и почему схему, обвязку и автоматику делают так, а не иначе, и даёт цифры для проверки расчёта. Но каждый объект живёт по своим условиям: свой источник тепла, свой греющий пар, свой потребитель и свои требования экспертизы. Если сомневаетесь в цифре, в порядке действий или в том, подходит ли правило к вашему проекту, уточните у своего руководителя или у нашего инженера, прежде чем закладывать решение в проект. Спросить — это профессионально; ошибиться «потому что так было в руководстве» — нет.

Для кого руководство и какой это уровень. Это уровень 3 «Инженерный»: исходные данные, расчёты, схемы, обвязка, проект. Кому какие разделы:

- **проектировщик тепломеханики и теплоснабжения** — всё руководство, в первую очередь разделы 3–7 и чек-листы;
- **ГИП, главный инженер и главный энергетик заказчика** — разделы 1–3 (нужен ли тепловой насос и какой) и раздел 10 (типовые ошибки);
- **технолог предприятия** — разделы 3 и 5 (источник сбросного тепла и его требования);
- **проектировщик автоматики** — раздел 8;
- **эксперт и технический надзор** — разделы 9 и 10.

Порядок разделов повторяет порядок работы над проектом:

- **разделы 1–2** — решить, есть ли смысл в абсорбционном тепловом насосе и какого типа;
- **раздел 3** — собрать исходные данные по всем контурам;
- **раздел 4** — посчитать баланс, подъём температуры, расходы и годовой эффект;
- **разделы 5–7** — проверить источник тепла, выбрать схему включения и нарисовать обвязку;
- **разделы 8–10** — автоматика и режимы, российские нормы, типовые ошибки и итоговый чек-лист.

Тепловой насос собран из тех же аппаратов, что абсорбционная холодильная машина. Поэтому обвязку пара, горячей воды и газа, дымоход, компоновку машинного зала и нормы на оборудование под давлением здесь не повторяем: они подробно разобраны в руководстве серии «АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка» (ЭХ-АРМ001-RU). **Рабочая цифра для проекта — всегда из листа технических данных конкретной модели на ваш режим:** его выдаём бесплатно по опросному листу (раздел 3).

ПРИМЕЧАНИЕ

Чем мы помогаем проектировщику. «Энергия Холода» — эксклюзивный партнёр Thermax в России с 2011 года. Проектировщику заказчика бесплатно: подбор машины на ваш режим, основные технические решения (ОТР), схемы обвязки и проверка раздела до экспертизы.

1. Когда АБТН имеет смысл

Абсорбционный бромистолитиевый тепловой насос (АБТН) делает тепло из тепла. Он берёт тёплую воду, которую предприятие сегодня охлаждает на градирне, добавляет немного дорогого тепла — пара, горячей воды, газа или дымовых газов — и отдаёт горячую воду, которую сегодня греет котёл.

Внутри это та же абсорбционная машина, что и АБХМ: испаритель, абсорбер, генератор, конденсатор, вода как хладагент, раствор бромистого лития как абсорбент. По формулировке Thermax, цикл один и тот же, отличаются температурные диапазоны. У холодильной машины продукт — холодная вода из испарителя, у теплового насоса — горячая вода из абсорбера и конденсатора.

Отсюда фраза, которую стоит держать в голове при проектировании: **тепловой насос — это чиллер, у которого градирню заменили потребителем тепла.**

1.1. Два типа машин

Машины для нагрева бывают двух типов. Путаница между ними — самая частая ошибка в техническом задании.

Тип 1 — тепловой насос (absorption heat pump, Type I). На входе дорогое тепло плюс бросовое. На выходе тепла больше, чем подано дорогого, а температура — средняя между источником и греющей средой. Тепловой коэффициент (COP, coefficient of performance) одноступенчатой машины — **1,65–1,75**, двухступенчатой — **2,05–2,15**. Подъём температуры — на **30–60 °C** выше температуры бросового источника.

Рисунок 1 Тепловой насос первого типа: 1 кВт дорогого тепла и 0,7 кВт бросового дают 1,7 кВт горячей воды



Физического противоречия нет: $1,0 + 0,7 = 1,7$. Машина не создаёт энергию, а поднимает бросовую до нужного уровня.

Как это делится по долям, показывает схема Thermax для технологических производств: вода 35 °C проходит испаритель и охлаждается до 30 °C, пар в генераторе «поднимает» это тепло до 90 °C. Около **40 %** полезного тепла машина берёт из бросовой воды, около **60 %** — из пара.

Тип 2 — термотрансформатор (absorption heat transformer, Type II). Дорогого тепла нет вообще. Бросовый поток средней температуры делится на две части: меньшую машина отдаёт горячее исходной, большую сбрасывает в холодную среду. Коэффициент — около **0,5**: в долях подведённого тепла 0,48 уходит потребителю на высоком уровне, 0,52 — в сброс. По обзорам, при источнике 40–60 °C одна ступень даёт воду на **15–30 °C** горячее источника.

Сравнивать 0,5 и 1,7 напрямую нельзя: у них разные знаменатели. У первого типа в знаменателе купленное топливо, у второго — тепло, которое и так выбрасывали.

Таблица 1 Два типа машин

	Тип 1 — тепловой насос	Тип 2 — термотрансформатор
Чем греем	дорогое тепло + бросовое	только бросовое
Что дополнительно нужно	потребитель, способный принять всё тепло	холодная среда для сброса: вода 15–20 °C или воздух не выше 10 °C
Что растёт	количество тепла	температура тепла
Тепловой коэффициент	1,65–1,75 (одноступенчатая), 2,05–2,15 (двухступенчатая)	около 0,5
Температура источника	25–50 °C, в отдельных подборках до 60 °C	40–60 °C
Подъём одной ступенью	30–60 °C	15–30 °C
Распространённость	основная часть мирового парка	единичные установки

ПРИМЕЧАНИЕ

По умолчанию речь идёт о первом типе. В референс-листе Thermax по тепловым насосам из 74 экспортных машин четыре — второго типа (Италия, Германия, Китай, США). Второй тип рассматривают, когда пара и газа на площадке нет, а бросового тепла 40–60 °C много.

1.2. Три условия, при которых АБТН вообще обсуждают

Разговор об абсорбционном тепловом насосе имеет смысл, когда на площадке одновременно есть три вещи:

- 1. Постоянный поток тёплой воды 25–50 °C**, который сейчас уходит в градирню, в канализацию или в реку. Источник второго типа — 40–60 °C.
- 2. Потребитель горячей воды 60–105 °C:** технология, мойка, подогрев питательной воды котла, теплосеть, горячее водоснабжение.
- 3. Источник дорогого тепла** для первого типа: пар, горячая вода, дымовые газы или газ.

Нет потребителя — тепло девать некуда. Нет бросового потока — машина превращается в дорогой котёл. Нет греющей среды — остаётся только второй тип, и то при холодной среде для сброса.

К этим трём условиям добавьте два практических. **Нагрузка постоянная**, а не два месяца в году: экономику АБТН делают часы работы. **Есть отапливаемое помещение:** внутри машины вода под вакуумом, на улицу её не ставят.

ВНИМАНИЕ

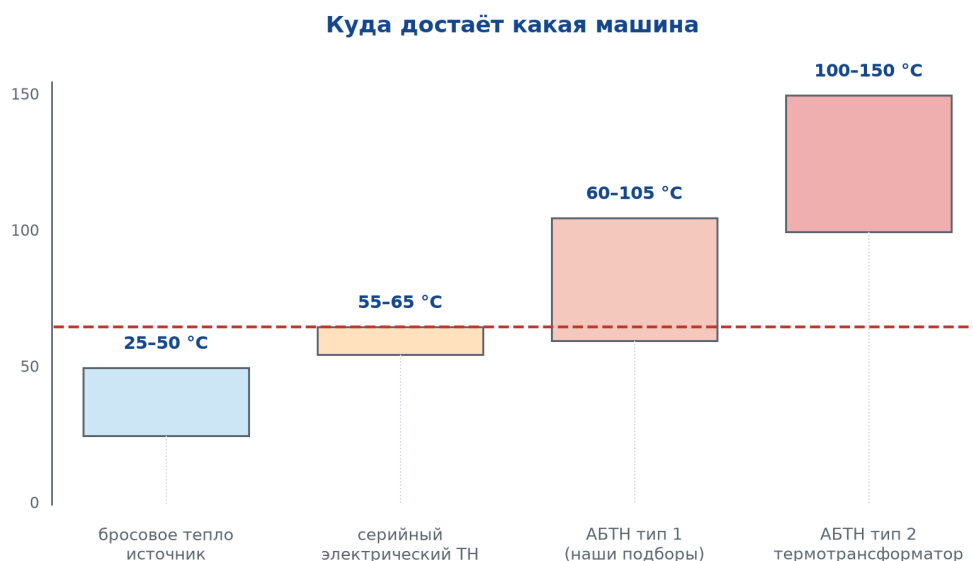
Важен не градус, а расход. «Вода 40 °С» — половина исходных данных. Тепло источника — это температура, умноженная на расход, и подбор без расхода не запускается. Что собрать до подбора — в разделе 3.

1.3. Где проходит граница с электрическим тепловым насосом

Чем платим. Электрический насос тратит электричество, абсорбционный — тепло. Своё электропотребление у АБТН — насосы раствора и щит. У машины на 9221 кВт тепла это 28,9 кВА, у машины на 3458 кВт — 14,9 кВА, то есть 0,3–0,4 % от выданного тепла. Электрическому насосу на 5 МВт тепла, по оценкам, нужно порядка 1,5–2 МВт электрической мощности, и на многих заводах такого резерва нет.

Потолок температуры. Отчёт Международного энергетического агентства «Application of Industrial Heat Pumps» называет его отдельным барьером отрасли: большинство серийных электрических тепловых насосов дают на выходе ниже 65 °С, серийные промышленные машины — до 65 °С при мощности до 700 кВт. Абсорбционные машины Thermax дают горячую воду 35–90 °С по стандартной брошюре, до 95 °С в исполнениях с одновременным холодом, а реальный подбор SS 80D P — 60 → 105 °С.

Рисунок 2 Куда достает какая машина: бросовое тепло, серийный электрический тепловой насос, АБТН первого и второго типа



Красная черта — потолок серийных электрических тепловых насосов, 65 °С (отчёт МЭА). Абсорбционные машины его перешагивают.

Таблица 2 Где проходит граница с электрическим тепловым насосом

	Абсорбционный ТН	Электрический ТН
Что тратит	пар, горячую воду, газ, дымовые газы	электричество
Хладагент	вода	фреон (R134a и другие)
Собственное электропотребление	0,3–0,4 % от тепла	порядка трети тепловой мощности
Потолок температуры	90–105 °С	около 65 °С

	Абсорбционный ТН	Электрический ТН
Мощность одной машины	0,25–40 МВт	до 0,7 МВт у серийных

Вывод. Электрический насос — там, где нет пара и газа, нужна небольшая мощность, электричество дешёвое и хватает 60–65 °С. Абсорбционный — где на площадке уже есть пар, газ или горячие газы, нужны мегаватты и температура выше 65 °С. Существуют и гибриды: абсорбционная и компрессорная машины работают вместе, одна поднимает до среднего уровня, вторая дожимает (раздел 6).

1.4. Где проходит граница с котлом

Котёл проще, дешевле, легче и монтируется быстрее. **Без бросового источника тепла АБТН котлу проигрывает** — экономика машины держится только на той доле тепла, которая достаётся даром.

Когда источник есть, цифры меняются. По обзору «Тепловые насосы» («Справочник промышленного оборудования», 2004) удельный расход топлива на выработку тепла в АБТН на **40–60 %** ниже, чем в котельной. Расход первичного топлива на то же количество тепла ниже на **24–33 %** у одноступенчатых машин и на **43–45 %** у двухступенчатых. Выбросы — на **30–45 %** меньше.

Для подогрева питательной воды котла до 90–105 °С, который обычно делают паром, брошюра Thermax называет экономию топлива **до 40 %**: столько тепла машина берёт из оборотной воды.

Расчёт: газовая машина против водогрейного котла. Возьмём реальный подбор Thermax GS 20A P с прямым сжиганием газа: источник — вода 60 → 50 °С, 36,8 м³/ч; горячая вода 70 → 90 °С, 44 м³/ч; газ с высшей теплотой сгорания 9650 ккал/м³. Работа 7000 ч в год. КПД котла примем 0,92 и для простоты отнесём к той же теплоте сгорания.

Таблица 3 Разобранный расчёт: шаги

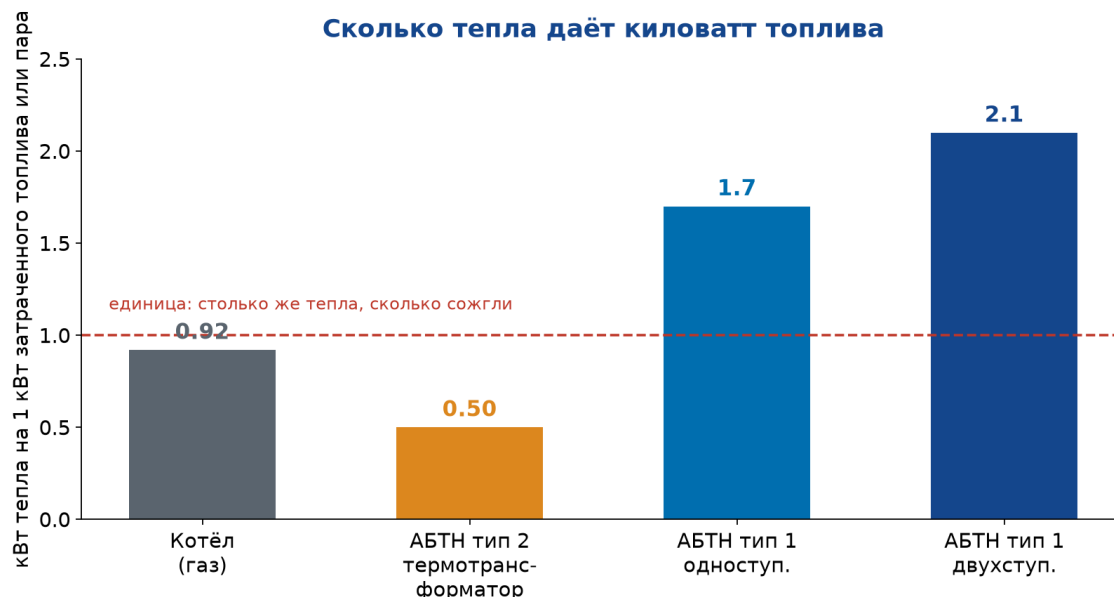
Шаг	Расчёт	Результат
Тепло потребителю (из подбора)	862 828 ккал/ч	1003 кВт
Отбор у источника (из подбора)	$36,8 \times 985,7 \times 1,0015 \times (60 - 50)$	422 кВт
Подведено в генератор (из подбора)	501 644 ккал/ч	583 кВт
Тепловой коэффициент цикла	1003 / 583	1,72
Газ на машину (из подбора)	$61,2 \text{ м}^3/\text{ч} \times 9650 \text{ ккал}/\text{м}^3$	687 кВт
Коэффициент «от газового счётчика»	1003 / 687	1,46
Газ на котёл той же мощности	$1003 / 0,92 = 1090 \text{ кВт}; 1090 \times 860 / 9650$	97,1 м³/ч
Экономия газа	97,1 – 61,2	35,9 м³/ч, 37 %
Экономия за год	$35,9 \times 7000$	≈ 251 000 м³

Итог: машина экономит около трети газа против котла. Коэффициентов два: 1,72 — эффективность цикла, ею сравнивают машины; 1,46 — эффективность от газового счётчика, ею считают деньги. В расчёте всегда указывайте, какой из двух назван.

ВНИМАНИЕ

Экономику делают часы. Отчёт МЭА фиксирует ожидания промышленности: окупаемость тепловых насосов против газовых и мазутных котлов — 2–3 года, до пяти лет соглашаются немногие. Уложиться в эти сроки можно только при долгой работе в году и высоком коэффициенте. Сезонная нагрузка в два-три месяца экономику обычно не держит.

Рисунок 3 Сколько тепла даёт 1 кВт топлива или пара: котёл, термотрансформатор, одноступенчатый и двухступенчатый тепловой насос



У типа 2 коэффициент ниже единицы — и это не брак: он покупается температурой, а не количеством.

1.5. Где проходит граница с АБХМ

АБХМ и АБТН — одно семейство машин. Выбор между ними задаёт не устройство, а вопрос «что объекту нужно».

АБХМ — если нужен холод: холодная вода $+7/+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а тепло машины уходит в градирню. **АБТН** — если нужно тепло $60\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$, а бросовая вода $25\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ есть. **Машина «холод + тепло»** — если объекту нужно и то и другое одновременно или по сезонам (раздел 2.5).

У любого подбора АБТН в спецификации две мощности: тепловая (Heating Capacity) и холодильная (Cooling Capacity). Холод — это тепло, снятое с источника в испарителе. Если источник — технологический контур, который всё равно надо охлаждать, этот киловатт становится полезным холодом. Пример из подбора SS 20D P: источник $24 \rightarrow 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагреваемая вода $50 \rightarrow 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, машина одновременно даёт **1068 кВт тепла и 409 кВт холода**.

Подробно об АБХМ, общей обвязке, компоновке машинного зала, газе и дымоходе — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка».

1.6. Типовые объекты

Где сходятся бросовое тепло, потребитель и греющая среда, по референс-листам и брошюрам Thermax:

- **ТЭЦ, котельные, мусоросжигательные заводы.** Пар низкого давления после турбин греет сетевую воду, бросовое тепло — дымовые газы, обратная вода, геотермальная вода. Главный мировой рынок АБТН — районное теплоснабжение Дании и Швеции (раздел 11).
- **Целлюлозно-бумажные и деревообрабатывающие комбинаты.** Много обратной воды 35–40 °С, свой пар, потребность в технологической воде 65–85 °С.
- **Химия и нефтехимия.** Сбросная вода после реакторов, пар на площадке; здесь же реальная ниша второго типа.
- **Пищевые и напитки:** солод, пивоварение, молочные производства, кондитерские. Мойка, пастеризация, нагрев сиропов — и тут же потребность в холоде.
- **Автопром, текстиль, резина и шины, фармацевтика, окрасочные производства.** Горячая вода 75–105 °С для окрасочных камер и технологии, бросовое тепло печей и обратной воды.

ПРИМЕЧАНИЕ

Заказчик почти никогда не знает свои потоки. Отчёт МЭА прямо называет это главным барьером: знание о том, сколько тепла и холода реально требуют процессы, на предприятиях встречается редко. Поэтому проект АБТН начинается с замеров источника и потребителя за характерный период, а не с выбора машины. Что мерить — в разделах 3 и 5.

1.7. Таблица выбора

Таблица 4 Таблица выбора

Условие на объекте	АБТН тип 1	АБТН тип 2	Электрический ТН	Котёл
Бросовая вода 25–50 °С, постоянный расход	да	мало: нужен источник 40–60 °С	да	не использует
Пар, горячая вода, газ или дымовые газы на площадке	нужны	не нужны	не нужны	газ или другое топливо
Холодная среда для сброса (вода 15–20 °С)	не нужна	обязательна	не нужна	не нужна
Нужна вода выше 65 °С	да, до 90–105 °С	да, горячее источника на 15–30 °С	нет, потолок около 65 °С	да
Мощность	0,25–40 МВт на машину	по подбору завода	сотни кВт	любая
Свободная электрическая мощность	почти не нужна	почти не нужна	порядка трети тепловой	почти не нужна
Нагрузка круглый год	обязательна для окупаемости	обязательна	желательна	не важна
Нет бросового тепла	проигрывает котлу	невозможен	возможен на воздухе или грунте	выбор по умолчанию

Чек-лист раздела 1: нужна ли здесь АБТН

- ☐ Найден постоянный поток тёплой воды 25–50 °С (для второго типа 40–60 °С), известны его температура и расход
- ☐ Есть потребитель горячей воды 60–105 °С, который примет всё тепло машины

- ☐ Для первого типа на площадке есть пар, горячая вода, газ или дымовые газы; для второго — холодная среда для сброса
- ☐ Нагрузка постоянная, часы работы в году известны
- ☐ Требуемая температура выше 65 °С или нужна мощность в мегаваттах — иначе сравнить с электрическим тепловым насосом
- ☐ Посчитана экономия против котла с обоими коэффициентами: цикла и «от счётчика»
- ☐ Есть отапливаемое помещение под машину

Правило прохода: все пункты отмечены — объект стоит подбора, переходите к исходным данным (раздел 3). Не выполнены первые два — АБТН здесь не нужна, рассмотрите котёл, электрический тепловой насос или АБХМ.

2. Устройство и типы машин Thermax

2.1. Чем АБТН отличается от АБХМ

Аппараты те же, что у абсорбционной холодильной машины: генератор (десорбер), конденсатор, испаритель, абсорбер, теплообменники растворов, герметичные насосы раствора и хладагента. Нового аппарата в тепловом насосе нет. Меняются уровни температур и назначение внешних контуров.

Таблица 5 Чем АБТН отличается от АБХМ

	АБХМ	АБТН тип 1
Продукт	холодная вода из испарителя	горячая вода из абсорбера и конденсатора
Испаритель подключён к	потребителю холода	бросовому потоку заказчика
Абсорбер и конденсатор подключены к	градирне	потребителю тепла
Градирня	обязательна	в чистом режиме нагрева не нужна
Температура продукта	холодная вода, стандарт +7/+12 °С	горячая вода 35–90 °С, по подборам до 105 °С
Что будет, если продукт не нужен	градирня примет любое тепло	потребитель «наелся» — машина встанет

Из таблицы следуют три вещи, которые проектировщик закладывает с первого листа.

Контур нагреваемой воды идёт последовательно: сначала абсорбер, потом конденсатор. В абсорбере температура ниже, в конденсаторе выше, поэтому обратная вода заходит туда, где холоднее. В спецификации это строка «Passes in Absorber / Condenser»: у SS 80D P, например, 8 ходов в абсорбере и 2 в конденсаторе. Перепутанные при монтаже патрубки дают недобор нескольких градусов на выходе при полном расходе.

Потребитель обязан принять всё тепло. У чиллера градирня готова принять сколько угодно, у теплового насоса потребитель может не взять. Куда сбрасывать избыток, когда тепло не нужно, — раздел 6.

Машина горячая. Подборы Thermax действительны только для изолированной машины. При выходе выше 90 °С потери через корпус дают невязку теплового баланса 1–5 %, и это норма, а не ошибка подбора.

2.2. Цикл первого типа простыми словами

Раствор бромистого лития кипит в генераторе под действием пара, газа или горячей воды. Выпаренный водяной пар идёт в конденсатор, конденсируется и отдаёт тепло нагреваемой воде. Конденсат стекает в испаритель, где при глубоком вакууме кипит, отбирая тепло у бросового потока. Пар из испарителя поглощает крепкий раствор в абсорбере — и при этом тоже отдаёт тепло нагреваемой воде.

Баланс машины читается одной строкой:

$Q_{\text{т}} = Q_{\text{г}} + Q_{\text{и}}$, где $Q_{\text{т}}$ — тепло потребителю, $Q_{\text{г}}$ — тепло, подведённое в генератор, $Q_{\text{и}}$ — тепло, взятое у бросового потока, кВт.

Тепловой коэффициент $\phi = Q_{\text{т}} / Q_{\text{г}} = 1 + Q_{\text{и}} / Q_{\text{г}}$. Отношение $Q_{\text{и}} / Q_{\text{г}}$ — это холодильный коэффициент той же машины в режиме чиллера: 0,70–0,75 у одноступенчатой, 1,05–1,15 у двухступенчатой. Отсюда $\phi = 1,70–1,75$ и 2,05–2,15. Меньше единицы у первого типа коэффициент быть не может: в худшем случае машина отдаст то, что получила.

Доля бесплатного тепла $f = 1 - 1/\phi$. При $\phi = 1,72$ это 42 %.

Пример на реальном подборе. Машина SS 70B TP: источник $40 \rightarrow 25$ °C, 226,2 м³/ч; пар 6,5 бар изб., 8098 кг/ч; горячая вода $45 \rightarrow 85$ °C, 200 м³/ч.

Таблица 6 Разобранный расчёт: шаги

Шаг	Расчёт	Результат
Тепло источника $Q_{\text{и}}$	из паспорта	3909 кВт
Тепло пара $Q_{\text{г}}$	из паспорта	5312 кВт
Баланс	$3909 + 5312$	9221 кВт = паспортной мощности
Коэффициент	$9221 / 5312$	1,74
Доля бесплатного тепла	$3909 / 9221$	42 %
Проверка по воде	$200 \times 4,19 \times 40 / 3,6$	9312 кВт, +1 % за счёт плотности горячей воды

Итог: на каждые 100 кВт горячей воды машина тратит 58 кВт пара, остальные 42 кВт берёт из воды, которая раньше уходила в градирню.

Рисунок 4 Цикл теплового насоса первого типа: бросовое тепло входит в испаритель, нагреваемая вода проходит абсорбер и конденсатор



Тепло потребителю снимается дважды — в абсорбере и в конденсаторе. Поэтому его больше, чем подведено в генератор.

2.3. Цикл второго типа: аппараты меняются местами

У термотрансформатора те же четыре аппарата, но переставлены давления. Испаритель и абсорбер работают на высоком давлении, генератор и конденсатор — на низком. Бросовой поток подается сразу в два аппарата: в генератор и в испаритель. Конденсатор сбрасывает тепло в холод-

ную среду. Хладагент из конденсатора в испаритель и крепкий раствор из генератора в абсорбер поднимаются **насосами** — снизу вверх по давлению. Продукт — тепло абсорбера, самая высокая температура в машине.

Рисунок 5 Цикл термотрансформатора: испаритель и абсорбер на высоком давлении, генератор и конденсатор на низком



Внешнего пара нет: один и тот же тёплый поток делится надвое. Половина поднимается по температуре, половина уходит в сброс.

Коэффициент: $\varphi_2 = Q_a / (Q_g + Q_i)$. Генератор и испаритель по мощности почти равны, поэтому полезный абсорбер получает около половины подведённого. В расчёте одноступенчатого термотрансформатора из книги Herold, Klein, Radermacher «Absorption Chillers and Heat Pumps» генератор принимает 185,4 кВт, испаритель 187,3 кВт, абсорбер отдаёт 184,4 кВт: $\varphi_2 = 184,4 / 372,7 = 0,495$. Там же показано, что без теплообменника растворов коэффициент падает до 0,41, а с очень хорошим поднимается до 0,51.

Для проекта у второго типа два отличия. **Внешних контуров четыре:** бросовый поток в генератор, он же в испаритель, горячая вода из абсорбера, холодная вода на конденсатор. **Высокая сторона работает около атмосферного давления:** в том же расчёте — 105,3 кПа, низкая — 15,8 кПа. На мировых установках второго типа от бросовой воды 90 °С и пара 100 °С получали пар 130–145 °С.

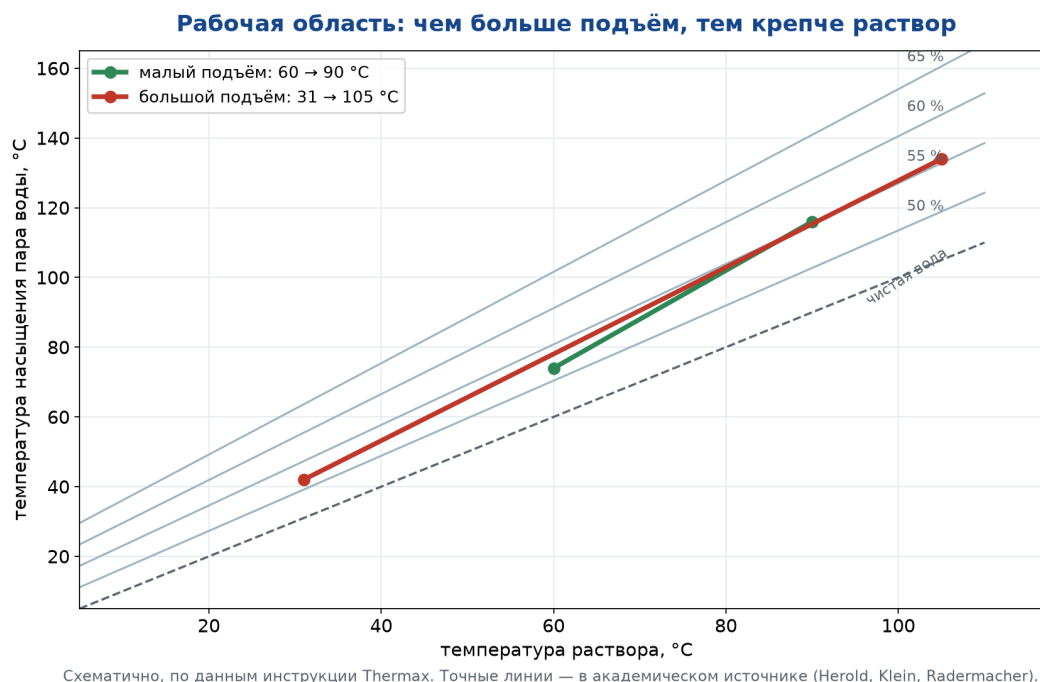
2.4. Рабочая область и температурный подъём

Температурный подъём — разница между температурой горячей воды на выходе и температурой источника на входе. В письмах и заданиях всегда пишите обе температуры: «источник 24 °С, выход 70 °С, подъём 46 °С», а не просто «подъём 46 °С».

Подъём ограничен раствором. Чтобы отдать тепло воде 90 °С, раствор в абсорбере должен быть горячее её и при этом поглощать пар низкого давления из испарителя. Это возможно только при высокой концентрации, а она приближает кристаллизацию: по инструкции Thermax раствор 55 % кристаллизуется при 5 °С, 60 % — при 17 °С, 65 % — при 42 °С. Контроллер Thermax следит за разницей между температурой раствора и температурой кристаллизации и при запасе меньше 8

°С сам прикрывает подачу греющей среды. На большом подъёме машина ограничивает себя по мощности.

Рисунок 6 Рабочая область: чем больше подъём, тем крепче раствор и ближе линия кристаллизации



Ориентир по подборам Thermax (точный коэффициент — только из подбора завода, расчёт — в разделе 4):

Таблица 7 Рабочая область и температурный подъём

Подъём	Тепловой коэффициент	Что это значит
до 40 °С	1,65–1,75	штатная задача
40–55 °С	1,5–1,65	рабочая задача; 55 °С — максимум по брошюре серии XP
55–65 °С	1,3–1,5	на грани, нужно подтверждение завода
больше 65 °С	1,2–1,3	только под конкретный подбор
больше 80 °С	—	одной ступенью не решается, нужен каскад (раздел 6)

ВНИМАНИЕ

Более горячий пар не повышает коэффициент одноступенчатой машины. Он нужен, чтобы дотянуться до требуемого подъёма. Скачок коэффициента даёт только переход на двухступенчатую машину.

2.5. Исполнения по греющему источнику

Машины первого типа различают по тому, что подаётся в генератор. По референс-листу Thermax индекс модели начинается с буквы греющей среды: SS — пар, HS — горячая вода, ES — выхлопные газы, GS — прямое сжигание газа. Машины второго типа в том же листе имеют индексы LT ... PT.

Таблица 8 Исполнения по греющему источнику

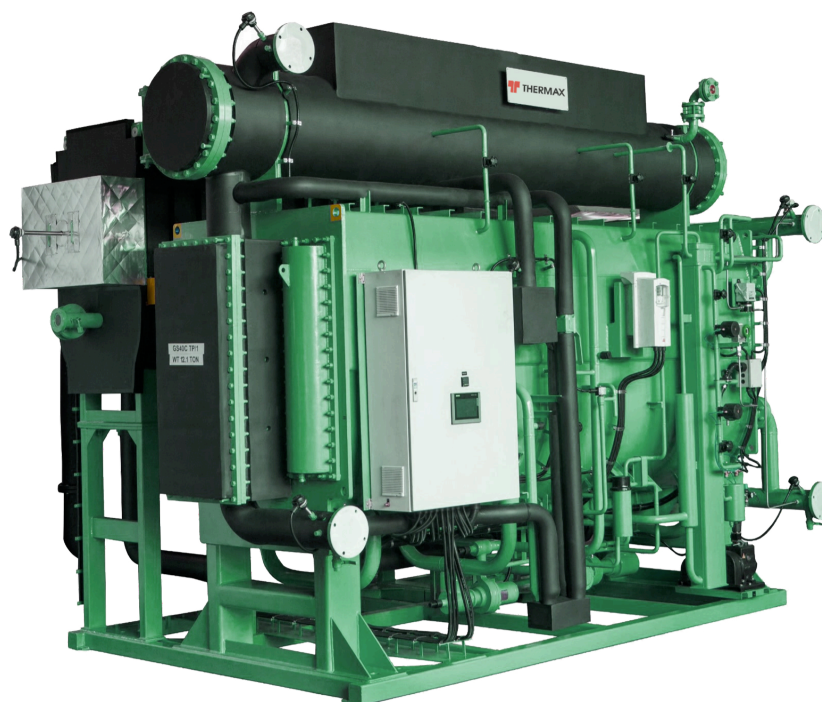
Греющая среда	Параметры по брошюре Thermax «Absorption Heat Pump XP»
Пар	сухой насыщенный, 2–10 бар
Горячая вода	140–180 °C
Выхлопные и дымовые газы	275–600 °C
Прямое сжигание	природный газ, дизельное топливо, биогаз
Источники бросового тепла	вода градиен, геотермальная вода, технологическая горячая вода, конденсация дымовых газов
Горячая вода на выходе	35–90 °C, подъём не более 55 °C
Тепловая мощность	0,25–40 МВт

Обязка пара, горячей воды, газа и дымохода — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АВХМ Thermax», требования к источнику — в разделе 5.

2.6. Машина «холод + тепло»: одна машина на два сезона

Chiller-heater — исполнение, которое летом делает холод, а зимой тепло, или то и другое одновременно. Это не два аппарата, а один: цикл тот же, меняется то, какой поток объявлен продуктом и куда уходит второй. Thermax называет три режима: охлаждение, нагрев и одновременный.

Рисунок 7 Машина Thermax Heat Pump Chiller: одна установка для холода и тепла



Брошюра Thermax «Heat Pump Chiller XP» делит машины на пять исполнений по главному продукту:

Таблица 9 Машина «холод + тепло»: одна машина на два сезона

Исполнение	Холод	Тепло
Только нагрев (Heating only Heat Pump)	—	горячая вода до 170 °С
Одновременный chiller-heater, главный продукт холод	0...35 °С	35...95 °С
Одновременный heat pump chiller, главный продукт тепло	5...35 °С	до 95 °С
Chiller heat pump, главный продукт тепло	5...35 °С	до 90 °С
Только охлаждение	до -5 °С на рассоле, 1 °С на чистой воде	—

Греющие источники для этой линейки по той же брошюре шире: пар 0–25 бар изб., горячая вода 60–250 °С, высокотемпературный органический теплоноситель 150–350 °С, газы двигателей, турбин и печей 250–600 °С, прямое сжигание.

Что даёт совмещение — пример Thermax. Нужно 210 TR холода и 2000 кВт тепла одновременно.

Таблица 10 Схемы chiller-heater по пару и результату

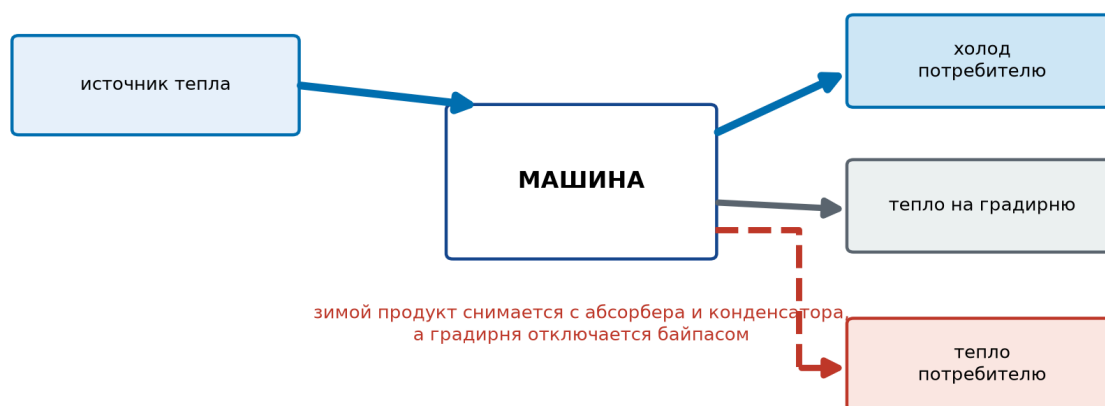
Схема	Пар	Результат
Абсорбционный чиллер + водогрейный генератор	736 + 3008 = 3744 кг/ч	210 TR и 2000 кВт
Одна машина Heat Pump Chiller	2558 кг/ч	те же 210 TR и 2000 кВт
Экономия	(3744 – 2558) / 3744	31,7 %, «до 32 %» по брошюре

Экономия берётся из того, что в отдельной схеме тепло чиллера уходит в градирню, а здесь попадает к потребителю. Брошюра называет также экономию воды до 60 %.

Рисунок 8 Chiller-heater: летний и зимний маршруты потоков одной машины

Chiller-heater: один аппарат, два маршрута

сплошная линия — лето, пунктир — зима



Чем за это платят. Переключается не «режим кнопкой», а маршруты потоков: в обвязке нужны клапаны с приводами на каждом маршруте и сезонная логика в автоматике (разделы 7 и 8). Градирня возвращается в схему как сток избытка тепла. Смена режима — это останов с циклом разбавления раствора и новый пуск, поэтому переключать режим чаще двух раз в год не следует.

По какому режиму подбирать. Считают годовую выработку $W = Q \times \tau$ для каждого режима. Пример: холод $2000 \text{ кВт} \times 2600 \text{ ч} = 5,2 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч}$; тепло $2500 \text{ кВт} \times 4200 \text{ ч} = 10,5 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч}$. Машину подбирают по теплу, недобор холода дешевле закрыть отдельным чиллером. Решение оправдано, когда оба режима работают от 2500–3000 ч в год и нагрузки сопоставимы; если один режим меньше 1500 ч, лучше машина под основной режим плюс котёл или чиллер.

2.7. Сводная таблица типов

Таблица 11 Сводная таблица типов

Тип	Греющий источник	Что нагревает	Коэффициент	Где применять
Тип 1, одноступенчатый	пар 2–10 бар, горячая вода 140–180 °С, газы 275–600 °С, газ	воду 35–90 °С, по подборам до 105 °С	1,65–1,75, падает с ростом подъёма	ТЭЦ, котельные, ЦБК, пищевые, автопром — основная часть объектов
Тип 1, двухступенчатый	пар высокого давления	то же	2,05–2,15	пар заметно горячее, чем нужно одноступенчатой машине
Тип 2, термотрансформатор	только бросовое тепло 40–60 °С и выше	воду или пар горячее источника на 15–30 °С	около 0,5	нет пара и газа, есть холодная среда для сброса: химия, металлургия
Chiller-heater	пар, горячая вода, газы, газ, органический теплоноситель	горячая вода до 95 °С и холод до 1 °С	экономия пара до 32 % против отдельной схемы	пищевые, молочные, фармацевтика, химия, окраска

Чек-лист раздела 2: тип машины выбран правильно

- ☐ Определён тип: первый (есть греющая среда) или второй (нет греющей среды, есть холодная среда для сброса)
- ☐ Указаны обе температуры подъёма: источник на входе и горячая вода на выходе
- ☐ Подъём не больше 55 °С или есть подтверждение завода; больше 80 °С — заложен каскад
- ☐ Греющая среда попадает в диапазон исполнения (пар 2–10 бар, вода 140–180 °С, газы 275–600 °С)
- ☐ Контур нагреваемой воды идёт через абсорбер, потом конденсатор
- ☐ Решено, куда сбрасывать избыток тепла, когда потребитель его не берёт
- ☐ Для машины «холод + тепло» посчитана годовая выработка по обоим режимам

Правило прохода: все пункты отмечены — тип и исполнение машины определены, можно собирать исходные данные для подбора (раздел 3) и считать (раздел 4).

3. Исходные данные

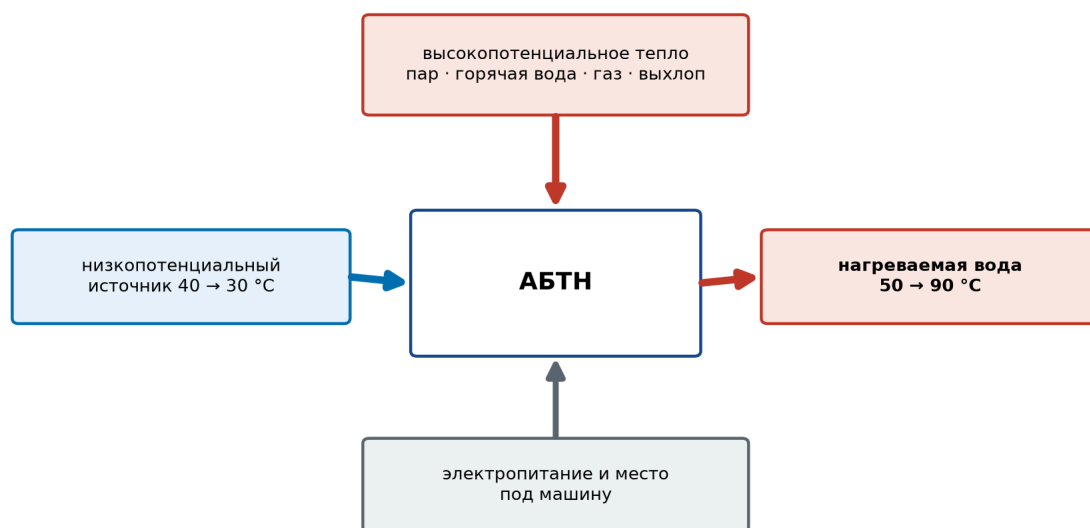
Абсорбционный тепловой насос (АБТН) стоит на стыке трёх чужих систем: технологии, которая выбрасывает тепло, котельной и потребителя горячей воды. Машину подбирают под конкретную расстановку температур, и запаса «в другую сторону» у неё нет. Поэтому ошибка в исходных данных здесь дороже, чем у чиллера.

3.1. Контуры машины

У машины первого типа три внешних контура: источник сбросного тепла, греющая среда и потребитель тепла. У машины второго типа (термотрансформатора) греющей среды нет, зато появляется контур холодной воды для сброса. У исполнения «холод + тепло» (chiller-heater) контуров четыре: источник, потребитель холода, потребитель тепла и греющая среда. Устройство типов — в разделе 2.

Рисунок 9 Четыре группы данных для подбора: нет данных хотя бы по одной — подбор не запускают

Четыре контура, о которых спрашивает опросный лист



Нет данных хотя бы по одному контуру — подбор не запускаем.

Таблица 12 Контуры машины

Контур	Минимум данных	Что будет, если ошибиться
Источник сбросного тепла	минимальная температура на входе, допустимая на выходе, расход, часы, качество воды	машина не выходит на мощность, коэффициент падает
Греющая среда	вид, давление и сухость пара, свободный расход в худший месяц, температура конденсата	недогрев, лишний расход пара
Потребитель тепла	подача и обратка, мощность или расход, график, резервный сток	машина «наедается» и уходит в останов
Холодная вода (тип 2)	температура, расход, круглогодичность	проект переделывается целиком
Площадка	зал, путь заноса, перекрытие, напряжение 380 или 415 В	переподбор, усиление перекрытия, трансформатор на монтаже

ВНИМАНИЕ

Опросный лист — гипотеза, замер — факт. Для коммерческого предложения хватает опросного листа. Для проекта каждой цифре по источнику нужен документ: журнал, выгрузка АСУ ТП, протокол замера.

3.2. Источник сбросного тепла

С температуры источника на входе начинается любой подбор: от неё зависят подъём, коэффициент и мощность (раздел 4.3). Ответ нужен цифрой на пять вопросов.

1. **Температура на входе.** Для первого типа рабочий диапазон 25–50 °С, оптимум 30–45 °С; ниже 20 °С подъём не посилен. Нужна минимальная устойчивая температура за год, а не средняя и не летняя. 2. **Допустимое охлаждение.** До какой температуры можно охладить поток без вреда для процесса, которому он нужен. Обычное охлаждение в машине — 5–8 °С. Этот ответ часто ограничивает мощность сильнее всего остального. 3. **Расход** при минимальной загрузке цеха, а не по паспорту насосов. 4. **Стабильность и часы:** провалы ночью, в выходные, на промывках; часы в году. 5. **Качество воды:** происхождение потока, мутность (требование производителя — не выше 10 ppm), взвесь, масло.

Программа замера (не меньше 7 суток, расходомер и логгеры) и требования к качеству воды — в разделе 5. Если источник — вода открытой градирни, продувка или сток, ставят разделительный теплообменник. Он съедает 2–4 °С температурного напора, и это закладывают в исходные данные подбора сразу.

3.3. Греющая среда

Опросный лист производителя допускает четыре вида греющей среды.

Таблица 13 Греющая среда

Греющая среда	Что указать	Диапазон по опросному листу
Пар	давление сухого насыщенного пара, расход, температура возврата конденсата	2–10 бар, типовое 8 бар
Горячая вода	температуры входа и выхода, расход, гликоль	вход 140–180 °С, выход около 90 °С
Выхлопные газы	температура, расход в кг/ч, состав, допустимое сопротивление тракта	300–600 °С, типовое 500 °С
Природный газ	низшая теплота сгорания, давление, свободный лимит	8000–9000 ккал/нм ³ , типовое 8050

По пару — три вопроса поверх листа. Сухость: влажный пар снижает мощность и вредит трубкам генератора. Свободный расход в самый напряжённый месяц, а не в среднем за год: летом пар уходит на технологию, зимой на отопление. Температура возврата конденсата цифрой: при 130 °С вместо 90 °С на ту же мощность нужно примерно на 8 % больше пара (раздел 4.5). Давление пара производитель требует держать постоянным; если оно гуляет, в задание пишут минимальное.

По газу сразу договариваются, по какой теплоте сгорания считается коэффициент (раздел 4.8). **По выхлопу** выясняют, не занято ли тепло котлом-утилизатором. Обвязка пара, газа, горячей воды и дымоход — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка».

3.4. Потребитель тепла

У машины первого типа нет градирни: её роль играет потребитель горячей воды. Если потребитель «наелся», обратка теплеет, раствор хуже поглощает пар, и машина уходит в останов. Что нужно:

- **мощность или расход нагреваемой воды.** Цифру из паспорта существующего котла проверяют по его фактической загрузке. Гигакалории переводят сразу: 1 Гкал/ч = 1163 кВт;
- **обратка (вход в машину).** По опросному листу — не ниже 35 °С, типовое 50 °С. Обратка отопления 20–25 °С означает смесительный узел или другую точку подключения (раздел 6). В работе руководство запрещает опускать нагреваемую воду ниже 10 °С;
- **подача.** Штатный верх по опросному листу — 90 °С. Выше — специальный подбор у завода: в спецификациях есть режим 60 → 105 °С, но ценой коэффициента (раздел 4.3). Спросите, откуда взялась цифра: часто 95 °С — привычка существующего котла, а не требование процесса;
- **среда:** вода или гликолевая смесь и её концентрация;
- **график и сезонность,** ночь и выходные;
- **резервный сток:** куда уходит тепло без потребителя — резервная градирня, сухой охладитель (раздел 6).

ВНИМАНИЕ

Проверка трёх цифр при заполнении. $Q \text{ (кВт)} \approx G \text{ (м}^3\text{/ч)} \times \Delta t \text{ (}^\circ\text{C)} \times 1,163$. Заказчик называет 1500 кВт, воду 60 → 70 °С и 40 м³/ч: $40 \times 10 \times 1,163 = 465$ кВт, втрое меньше. Одна из трёх цифр неверна, и выяснять это надо до подбора.

3.5. Холодная вода для типа 2 и четвёртый контур «холод + тепло»

Машина второго типа отдаёт меньшую часть сбросного тепла горячее источника, а большую сбрасывает в холодную среду. Условия:

- холодная среда — вода 15–20 °С или воздух не выше 10 °С, круглый год;
- расход холодной воды того же порядка, что и горячей воды на выходе (раздел 4.2);
- источник 40–60 °С и его много: на мегаватт продукта — больше двух мегаватт сбросного тепла.

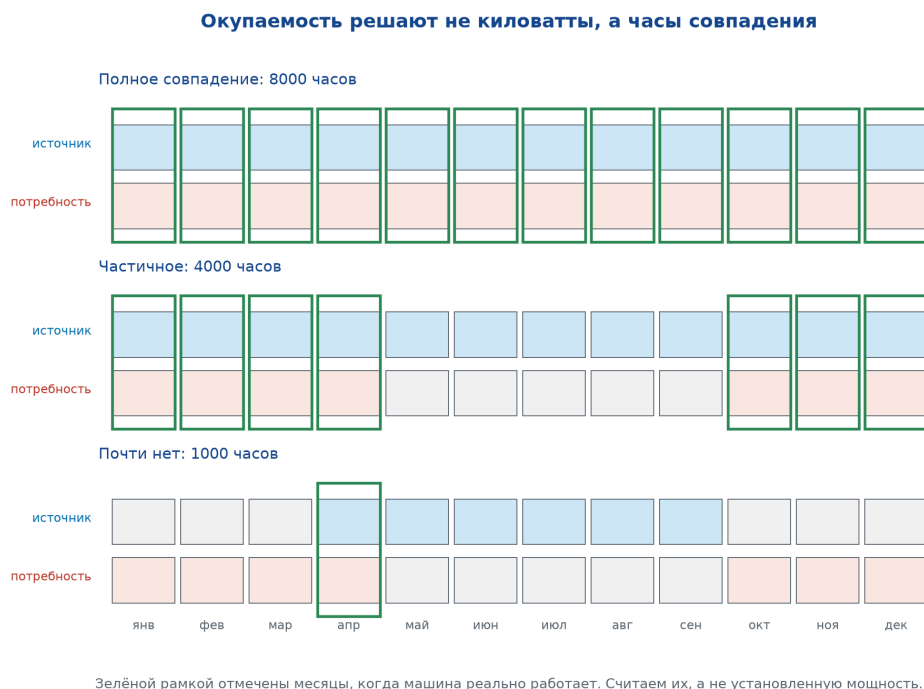
Летом в средней полосе воды 15–20 °С нет ни в градирне, ни в реке; реальны артезианская скважина, речной водозабор или технологический холод. Не выполнено хотя бы одно условие — разговор идёт про первый тип.

Исполнение «холод + тепло» добавляет данные потребителя холода: температуры, расход и часы работы каждого режима. По ним выбирают режим, на который подбирают машину (раздел 4.4). Летом, если потребитель тепла отключается, возвращается градирня как резервный сток меньшей мощности.

3.6. Годовой профиль и часы работы

Мощность задаёт размер машины, часы — её смысл. Годовую выработку считают по наименьшему из трёх сроков: часы источника, часы потребителя, часы греющей среды. Машина на 2000 часов в год окупается втрое дольше машины на 7000 часов при той же цене.

Рисунок 10 Считают месяцы, когда есть и источник, и потребитель, а не установленную мощность



Помесячно запрашивают: температуру и расход источника, нагрузку потребителя, свободный пар или газ и плановые ремонты котельной. Отдельно — суточные провалы источника: от них зависят буфер и схема с котлом (раздел 6).

Типичная картина: источник есть 8400 часов, пар — 8000, потребитель (отопление и подогрев подпитки) — 4600. Выработку считают по 4600 часам, а на остальные 3800 нужен резервный сток или второй потребитель. Расчёт — в разделе 4.6.

3.7. Опросный лист

В опросном листе на АБТН Thermax три блока и шапка (объект и город, контактное лицо с должностью, комментарий, дата). В скобках стоят типовые значения — подсказка, а не требование. Заказчик часто вписывает именно их, и чужая типовая цифра попадает в подбор.

Таблица 14 Опросный лист

Блок	Поле	Типовое значение и предел	Что проверить
1. Основные параметры	тепловая мощность, кВт, или расход нагреваемой воды, м ³ /ч	—	откуда цифра: расчёт, паспорт котла, «на глаз»
1	количество машин	—	что будет, если машина встанет на неделю
1	нагреваемая жидкость, гликоль	вода, 0 %	трубы на улице — может быть гликоль
1	температура на входе	50 °С, не ниже 35 °С	обратка ниже — смесительный узел
1	температура на выходе	90 °С, не выше 90 °С штатно	выше — спецподбор
2. Источник	охлаждаемая жидкость, гликоль	вода, 0 %	происхождение и чистота потока

Блок	Поле	Типовое значение и предел	Что проверить
2	температура на входе	40 °С	минимум или летний пик; чем измерено
2	температура на выходе	30 °С	допустимое охлаждение для процесса
2	расход	—	при минимальной загрузке
3. Греющая среда	горячая вода, вход / выход	150 / 90 °С, вход 140–180 °С	вода 105 °С в генератор не годится
3	пар: давление, расход	8 бар, 2–10 бар	сухость, свободный расход
3	выхлопные газы: температура, расход	500 °С, 300–600 °С	состав, сопротивление тракта
3	газ: низшая теплота сгорания	8050 ккал/нм ³ , 8000–9000	давление, лимит

В комментарий дописывают то, чего в листе нет: часы работы по трём контурам; температуру возврата конденсата; резервный сток тепла; площадку (зал +5...+45 °С по условиям подбора, проёмы, перекрытие по рабочему весу, место для вытягивания трубок); напряжение 380 или 415 В. Для типа 2 и исполнения «холод + тепло» — данные раздела 3.5.

ПРИМЕЧАНИЕ

Лист лучше заполнять вместе с заказчиком. Отправленный почтой возвращается наполовину пустым, а при совместном заполнении слышны оговорки вроде «летом тут по-другому» или «этот замер старый».

3.8. Чем оборачиваются ошибки в данных

Таблица 15 Чем оборачиваются ошибки в данных

Ошибка	Что происходит на объекте
Температура источника взята летним пиком	зимой машина теряет до трети мощности при том же расходе пара (раздел 4.4)
Источник охлаждают сильнее, «чтобы взять больше»	падает температура кипения и коэффициент, технология получает слишком холодную воду
Подача «с запасом»	105 °С вместо 90 °С стоят около 16 % греющего тепла (раздел 4.3)
Мощность по паспорту существующего котла	машина больше нужной и работает на частичной нагрузке
Не указана температура конденсата	расход пара ошибается до 8 %
Нет часов потребителя	экономия завышена почти вдвое, летом машина встаёт
Тип 2 без холодной воды	проект переделывают целиком

Чек-лист раздела 3: исходные данные

- ☐ Источник: минимальная температура за год из журнала или АСУ ТП, допустимое охлаждение согласовано с технологом.
- ☐ Источник: расход при минимальной загрузке по замеру, анализ воды, решение по разделительному теплообменнику.
- ☐ Пар: давление, сухость, свободный расход в худший месяц, температура конденсата цифрой.

- Газ: низшая теплота сгорания, давление, лимит; договорились, по какой теплоте считается коэффициент.
- Потребитель: подача, обратка не ниже 35 °С (или смесительный узел), мощность или расход, гликоль, график.
- Резервный сток тепла на время, когда потребителя нет.
- Тип 2: холодная вода 15–20 °С круглый год; «холод + тепло»: потребитель холода и часы режимов.
- Часы по трём контурам; выработка считается по наименьшему.
- Площадка: зал +5...+45 °С, путь заноса, перекрытие, вытяжка трубок, 380 или 415 В.
- Каждый контур проверен формулой $Q \approx G \times \Delta t \times 1,163$.

Правило прохода: подбор запускают, когда по каждому контуру есть температура, расход и часы работы с указанием, откуда цифра; хотя бы одна цифра по источнику «по памяти» — сначала замер.

4. Расчёты с примерами

Все расчёты АБТН стоят на тепловом балансе и температурном подъёме. Подбор делает завод; задача проектировщика — заложить правильные расходы и проверить присланную спецификацию. Примеры — на реальных подборках Thermax.

4.1. Тепловой баланс машины первого типа

Машина не производит и не уничтожает энергию. Тепло, отданное потребителю с абсорбера и конденсатора, равно сумме греющего тепла и тепла, взятого у источника в испарителе:

$$Q_{\text{т}} \approx Q_{\text{г}} + Q_{\text{и}}$$

где $Q_{\text{т}}$ — теплопроизводительность (heating capacity), кВт; $Q_{\text{г}}$ — тепло, подведённое в генератор греющей средой (heat input), кВт; $Q_{\text{и}}$ — тепло, отобранное у источника (в спецификации — cooling capacity, часто в тоннах холода TR), кВт. Небольшая часть уходит потерями через корпус.

Тепловой коэффициент (coefficient of performance, COP) — отношение полезного тепла к купленному:

$$\varphi = Q_{\text{т}} / Q_{\text{г}} = 1 + \varepsilon$$

где ε — холодильный коэффициент той же машины в режиме чиллера. У одноступенчатой машины на бромистом литии $\varepsilon = 0,70\text{--}0,75$, отсюда $\varphi = 1,70\text{--}1,75$; у двухступенчатой $\varphi = 2,05\text{--}2,15$. Меньше единицы φ быть не может физически: увидели $\varphi < 1$ — ищите ошибку в единицах.

Доля бесплатного тепла — сколько продукта пришло от источника:

$$f = Q_{\text{и}} / Q_{\text{т}} = 1 - 1/\varphi$$

Тепловой насос первого типа — это чиллер, у которого градирню заменили потребителем тепла. Отсюда главное требование к схеме: потребитель обязан принять всё тепло (раздел 6).

Рисунок 11 Тепловой баланс: по каждому из трёх потоков измеряют расход и две температуры



Сходится — машина работает. Не сходится — ищем, какой поток не тот, что записан в договоре.

Пример. Машина GS 20A P с прямым сжиганием газа, 1000 кВт. Из спецификации: источник 60 → 50 °С, 36,8 м³/ч; нагреваемая вода 70 → 90 °С, 44,0 м³/ч; подведено в генератор 501 644 ккал/ч; отводимое тепло 862 828 ккал/ч.

1. Испаритель по воде (средняя 55 °С: $\rho = 985,7$ кг/м³, $c = 1,0015$ ккал/(кг·°С)): $36,8 \times 985,7 \times 1,0015 \times 10 = 363\,282$ ккал/ч = **422 кВт**; заявлено 420 кВт. 2. Горячая вода (средняя 80 °С: $\rho = 971,8$, $c = 1,0022$): $44,0 \times 971,8 \times 1,0022 \times 20 = 857\,066$ ккал/ч = **997 кВт**; заявлено 1003 кВт, расхождение 0,7 %. 3. Коэффициент: $\varphi = 862\,828 / 501\,644 = 1,72$; доля бесплатного тепла $f = 1 - 1/1,72 = 0,42$. 4. Баланс: $501\,644 + 363\,282 = 864\,926$ ккал/ч против 862 828 — невязка **0,24 %**.

Итог: 583 кВт от газа плюс 422 кВт от сбросной воды дают 1000 кВт горячей воды 90 °С.

Таблица 16 Тепловой баланс машины первого типа

Невязка баланса	Что значит
до 1 %	норма для среднетемпературного режима
1–5 %	норма для горячих режимов (выход выше 90 °С): потери через корпус
5–10 %	требуется объяснения: учтена ли изоляция, куда отнесены потери
больше 10 %	ошибка расчёта

ВНИМАНИЕ

Подбор действителен только для изолированной машины. Это оговорка производителя в каждой спецификации: без изоляции производительность и расход греющей среды будут другими.

4.2. Тепловой баланс машины второго типа

Уравнение то же, но назначение аппаратов другое. Сбросное тепло подводится сразу в генератор и испаритель, полезно только тепло абсорбера на высокой температуре, а конденсатор сбрасывает остаток в холодную воду:

$$\varphi_2 = Q_a / (Q_g + Q_{и}) \approx 0,5$$

Генератор и испаритель работают с одним расходом пара хладагента, поэтому их мощности близки, и полезный абсорбер получает около половины подведённого. По данным производителей долевого баланс такой: подведено 1,0, получено на высокой температуре 0,48, сброшено 0,52. Академический расчёт одноступенчатой машины (Herold, Klein, Radermacher, «Absorption Chillers and Heat Pumps») даёт генератор 185,4 кВт, испаритель 187,3 кВт, абсорбер 184,4 кВт, конденсатор 188,3 кВт: вход и выход по 372,7 кВт, $\varphi_2 = 184,4 / 372,7 = 0,495$.

Сравнивать 0,5 с 1,7 первого типа нельзя: в знаменателе у второго типа не топливо, а тепло, которое и так выбрасывали.

Пример (учебный, по долевному балансу 0,48 / 0,52). Сбросная вода 200 м³/ч, 60 → 50 °С; нужна горячая вода 80 → 90 °С; есть артезианская вода 18 °С.

1. Подведено (55 °С: $\rho = 985,7$, $c = 1,0015$): $200 \times 985,7 \times 1,0015 \times 10 / 860 = 2296$ кВт. 2. Полезно: $2296 \times 0,48 = 1102$ кВт; сброс: $2296 \times 0,52 = 1194$ кВт. 3. Горячая вода (85 °С: $\rho = 968,6$, $c = 1,0028$): $1102 \times 860 / (968,6 \times 1,0028 \times 10) = 97,6$ м³/ч. 4. Холодная вода 18 → 28 °С (23 °С: $\rho = 997,5$, $c = 0,9987$): $1194 \times 860 / (997,5 \times 0,9987 \times 10) = 103,1$ м³/ч.

Итог: из 200 м³/ч сбросной воды получаем около 1,1 МВт в виде 98 м³/ч воды 90 °С и расходует 103 м³/ч холодной воды. На реальной машине к сбросу добавятся 2–4 % потерь через корпус.

Подъём здесь $90 - 60 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ — верхняя граница для одной ступени второго типа ($15\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ над температурой источника).

4.3. Температурный подъём и его пределы

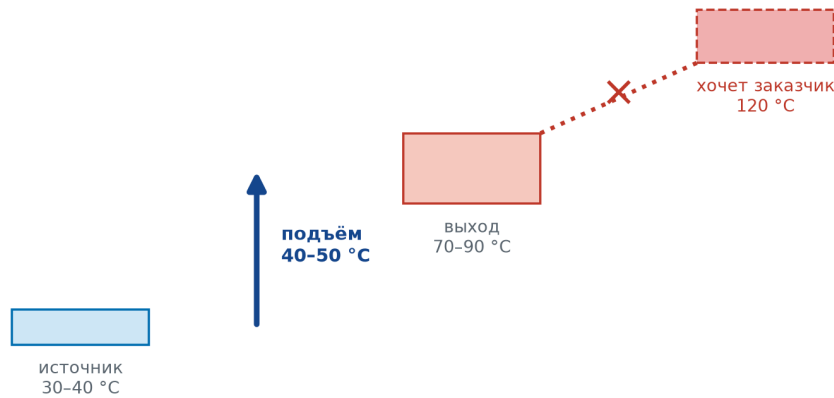
Полный подъём (temperature lift) — разница между горячей водой на выходе и источником на входе:

$$\Delta T = T_{\text{гв.вых}} - T_{\text{ист.вх}}$$

В переписке с заводом используют её. «Подъём по обратной воде» (от источника на выходе) всегда больше и выглядит эффектнее; заметить подмену просто — выпишите четыре температуры и возьмите максимум минус минимум. «Подъём $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ » без температур — фраза без смысла; «источник $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, выход $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, подъём $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ » — фраза, по которой можно считать.

Рисунок 12 Подъём одной ступени ограничен: «из 30 сразу 120 » не получится

Температурный подъём: главное ограничение подбора



За одну ступень подъём ограничен. Нужно больше — каскад из двух машин или другой тип цикла. Обещать «из 30 сразу 120 » нельзя.

От подъёма зависит коэффициент. Строки 30 , 46 и $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ — реальные подборы Thermax, промежуточные — интерполяция.

Таблица 17 Температурный подъём и его пределы

Подъём, $^{\circ}\text{C}$	30	40	46	55	65	74
Тепловой коэффициент ϕ	1,72	1,66	1,62	1,50	1,35	1,21
Доля бесплатного тепла	42 %	40 %	38 %	33 %	26 %	17 %
Греющее тепло на 1000 кВт продукта, кВт	581	602	617	667	741	826

Каталожный максимум одной ступени — $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (брошюра Thermax серии XP), рекорд реальных подборов — $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ при коэффициенте $1,21$. Рабочая шкала: до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ — задача штатная; $40\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$ — рабочая; $55\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$ — на грани, нужно подтверждение завода; больше $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ — только под конкретный подбор; больше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ — одной ступенью не решается, нужен каскад (раздел 6).

Почему подъём ограничен. Чтобы отдать тепло воде 90 °С, раствор в абсорбере должен быть горячее неё и при этом поглощать пар низкого давления из испарителя. Это возможно только при высокой концентрации, а чем она выше, тем ближе кристаллизация:

Таблица 18 Температура кристаллизации раствора по концентрации

Концентрация LiBr	55 %	60 %	65 %
Температура кристаллизации	5 °С	17 °С	42 °С

Контроллер считает концентрацию крепкого раствора и следит за запасом до кристаллизации на выходе из низкотемпературного теплообменника растворов. Когда запас меньше безопасного (в материалах производителя — 8 °С), контроллер прикрывает паровой клапан независимо от регулятора производительности. **Превышение подъёма не ломает машину — она сама срезает мощность** и не даёт того, что от неё ждут. Подробно об автоматике — раздел 8.

Хватит ли греющей среды. Для одноступенчатой машины расстояние от генератора до конденсатора примерно равно расстоянию от конденсатора до испарителя. С учётом напоров в аппаратах получается оценка:

Таблица 19 $T_{\text{греющ}} \geq 2 \times T_{\text{гв.вых}} - T_{\text{ист.вых}} + 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Подбор	Выход гор. воды, °С	Источник на выходе, °С	Нужно, °С	Подано	Итог
GS 20A P	90	50	142	газ, генератор до 150 °С	хватает, $\varphi = 1,72$
SS 20D P	70	17	135	пар 3 бар абс. (133 °С)	впритык, $\varphi = 1,62$
SS 80D P	105	26	196	пар 6 бар изб. (165 °С)	не хватает 31 °С, $\varphi = 1,21$

Более горячий пар не повышает коэффициент одноступенчатой машины, он лишь позволяет дотянуться до подъёма.

Пример. Нужно 3000 кВт воды 95 °С от оборотной воды 35 °С, пар 8 бар.

1. Подъём $95 - 35 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — зона «на грани», принимаем $\varphi \approx 1,4$. 2. Греющее тепло $3000 / 1,4 = 2143 \text{ кВт}$; при $\Delta H \approx 572 \text{ ккал/кг}$ пара 8 бар: $2143 \times 860 / 572 = 3222 \text{ кг/ч}$. 3. Если процессу хватит 85 °С: подъём 50 °С, $\varphi \approx 1,57$ (интерполяция между 46 и 55 °С), тепло 1911 кВт, пар **2873 кг/ч** — на 349 кг/ч (11 %) меньше. При 7500 часах это около 2620 т пара в год.

Итог: вопрос «откуда взялись 95 °С» — самый денежный вопрос проекта. При подъёме больше 55 °С коэффициент подтверждают подбором завода и диаграммой цикла: разброс оценки доходит до 0,1, это 7 % расхода пара.

4.4. Расходы по контурам

Каждый водяной контур считается одной формулой:

$$Q = G \times \rho \times c \times \Delta t / 3600$$

где Q — мощность контура, кВт; G — расход, м³/ч; ρ — плотность при средней температуре потока, кг/м³; c — теплоёмкость, кДж/(кг·°С); Δt — разница температур на контуре, °С. Для прикидки по воде $\rho \times c / 3600 \approx 1,163$, и формула превращается в $G = Q / (1,163 \times \Delta t)$. В проекте плотность берут при средней температуре: для горячей воды 80 °С она 971,8 кг/м³, и объёмный расход выходит примерно на 3 % больше прикидки.

Порядок для машины первого типа.

1. $Q_{\text{т}}$ — из потребности; ϕ — по подъёму (раздел 4.3). 2. $Q_{\text{г}} = Q_{\text{т}} / \phi$; $Q_{\text{и}} = Q_{\text{т}} - Q_{\text{г}}$. 3. Источник: $G_{\text{ист}} = Q_{\text{и}} / (1,163 \times \Delta t_{\text{ист}})$. 4. Нагреваемая вода: $G_{\text{гв}} = Q_{\text{т}} / (1,163 \times \Delta t_{\text{гв}})$. 5. Греющая среда — по разделу 4.5.

Расход источника на прикидке, м³/ч, при $\phi = 1,65$:

Таблица 20 Расходы по контурам

Тепло потребителю, кВт	Отбор у источника, кВт	Δt 5 °C	Δt 8 °C	Δt 10 °C
500	197	34	21	17
1000	394	68	42	34
1500	591	102	64	51
3000	1182	203	127	102
7500	2955	508	318	254

На 3 МВт тепла при Δt 8 °C нужно около 130 м³/ч сбросной воды; если на градирню идёт 40 м³/ч, вопрос закрыт.

Проверка диаметра — скорость в патрубке: $w = G / (3600 \times \pi \times d^2 / 4)$. Для подбора SS 60D P (источник 399,9 м³/ч, патрубок 250 мм): площадь 0,0491 м², $w = 2,26$ м/с. Нормальный коридор — 1,0–3,5 м/с; меньше 1 м/с или больше 3,5 м/с почти всегда означает, что перепутан расход или контур.

Что будет, если источник просядет. Тот же SS 60D P подобран на источник 39 → 31 °C, 399,9 м³/ч: отбор 3684 кВт, греющее тепло 5547 кВт, продукт 9231 кВт. Зимой источник приходит при 33 °C, расход прежний, выход испарителя остаётся 31 °C.

1. Отбор: $399,9 \times 1000 \times 4,19 \times 2 / 3600 = 931$ кВт вместо 3684. 2. Продукт при том же паре: $5547 + 931 = 6478$ кВт, 70 % от расчёта. 3. Коэффициент: $6478 / 5547 = 1,17$ вместо 1,66.

Итог: минус 6 °C на источнике — минус почти треть мощности при том же расходе пара. Расчёт упрощённый, но порядок верный: поэтому подбирают по гарантированному минимуму источника.

Исполнение «холод + тепло»: по какому режиму подбирать. Считают годовую выработку каждого режима $W = Q \times t$. Пример: холод 2000 кВт × 2600 ч = 5,2 млн кВт·ч; тепло 2500 кВт × 4200 ч = 10,5 млн кВт·ч. Машину подбирают по теплу, а недобор холода дешевле закрыть отдельным чиллером. Расходы в двух режимах разные, поэтому насос подбирают на худший случай или ставят с частотным регулированием.

ВНИМАНИЕ

Насосы внешних контуров не входят в электропотребление машины. В спецификации указаны только собственные насосы раствора и хладагента (у SS 80D P — 20,2 кВА). Насосы источника, нагреваемой воды и конденсата считает проектировщик по расходам этого раздела и потерям давления из спецификации.

4.5. Греющий пар и конденсат

Тепло, подведённое паром, считают по полной разности энтальпий: конденсация плюс охлаждение конденсата до температуры, с которой он уходит из машины.

$$Q_{\text{г}} = D \times (h'' - h_{\text{к}}) / 3600$$

где D — расход пара, кг/ч; h'' — энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг; $h_{\text{к}}$ — энтальпия конденсата на выходе, кДж/кг.

Пример. Машина SS 40С ТР на Светлогорском ЦКК. Пар 6,5 бар изб. (7,5 бар абс., около 168 °С), 3039 кг/ч, конденсат 80–100 °С; в паспорте $Q_{\text{г}} = 2005$ кВт.

1. $h'' = 2765$ кДж/кг; $h_{\text{к}}$ при 90 °С = 377 кДж/кг; $\Delta h = 2388$ кДж/кг. 2. $Q_{\text{г}} = 3039 \times 2388 / 3600 = 2016$ кВт — расхождение с паспортом 0,6 %. 3. Счёт только по скрытой теплоте ($r \approx 2056$ кДж/кг) даёт 1735 кВт — недобор 13 % и фантастический коэффициент 1,99 вместо 1,72.

Вторая машина того же объекта (8098 кг/ч, паспорт 5312 кВт) по тому же методу даёт 5371 кВт, расхождение 1,1 %.

Температура конденсата меняет расход пара. При конденсате 130 °С $h_{\text{к}} = 546$ кДж/кг, $\Delta h = 2219$ кДж/кг, и на ту же мощность пара нужно примерно на 8 % больше. Поэтому температуру конденсата фиксируют в задании цифрой (раздел 3.3) и спрашивают у завода, от чего считали пар.

Прикидка. По подборам SS 60D P (8462,6 кг/ч на 5547 кВт) и SS 80D P (9376,3 кг/ч на 6213 кВт): **около 1,52 кг пара в час на 1 кВт греющего тепла.** Для проекта расход считают по формуле с реальными параметрами пара.

Конденсат. Его расход равен расходу пара, температура на выходе 80–100 °С. У SS 60D P это 8,5 т/ч при давлении слива 1,0 кгс/см² — отдельный трубопровод, бак и насос возврата, которых нет в спецификации машины. Паровой регулирующий клапан приходит в комплекте отдельным местом и ставится на паропровод при монтаже. Обвязка пара и конденсата подробно — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU; пуск с медленным открытием парового клапана — в разделе 8.

4.6. Годовая экономия в энергии и условном топливе

Экономию считают в энергии и топливе, а в деньги её переводит заказчик по своим ценам.

Шаг 1. Часы. τ — наименьшее из трёх: часы источника, потребителя, греющей среды (раздел 3.6).

Шаг 2. Выработка тепла: $W = Q_{\text{т}} \times \tau$. **Шаг 3. Сэкономленное греющее тепло.** Бойлер на том же паре отдаёт столько, сколько получил ($\phi = 1$). Тепловой насос берёт от пара на Q и меньше.

Экономия: $\Delta Q = Q_{\text{и}} \times \tau$, то есть доля f от всей выработки. **Шаг 4. Перевод:** 1 МВт·ч = 0,86 Гкал (1 Гкал = 1163 кВт·ч).

Шаг 5. Топливо котельной: $\Delta B = \Delta Q / \eta_{\text{к}}$, где $\eta_{\text{к}}$ — КПД котельной (для прикидки 0,92; в проекте — фактический КПД котельной заказчика). **Шаг 6. Условное топливо:** 1 т у. т. = 7 Гкал (по определению условного топлива с теплотой сгорания 7000 ккал/кг).

Природный газ: низшая теплота сгорания 8050 ккал/м³ $\approx 9,36$ кВт·ч/м³.

Экономия на каждые 1000 кВт продукта и 1000 часов работы ($\eta_{\text{к}} = 0,92$):

Таблица 21 Годовая экономия в энергии и условном топливе

Подъём, °С	30	40	46	55	65	74
Сэкономлено тепла, МВт·ч	419	398	383	333	259	174
То же, Гкал	360	342	329	287	223	149
Условное топливо, т у. т.	55,9	53,1	51,1	44,5	34,6	23,2

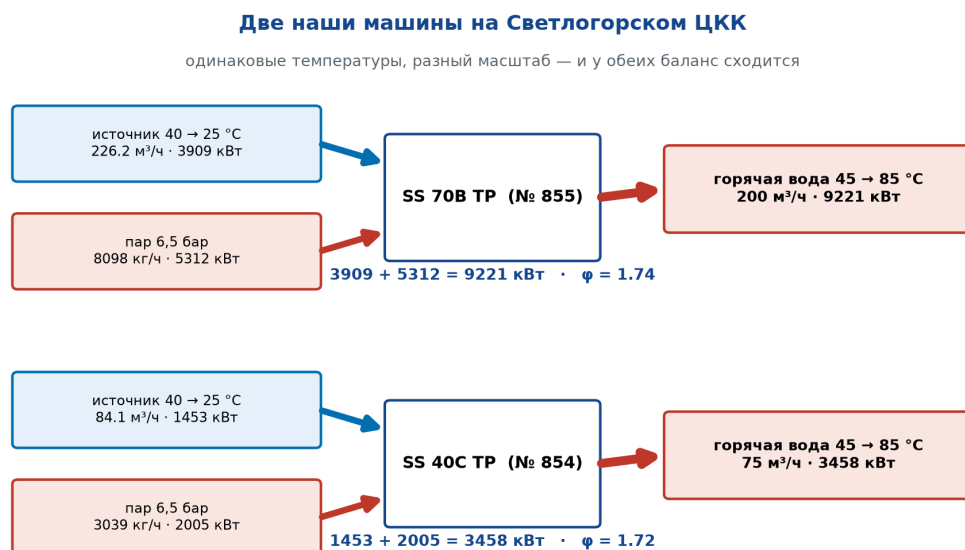
Экономия линейна по часам, а подъём 74 °С вместо 30 °С срезает её в 2,4 раза. Электричество насосов контуров, водоподготовку и обслуживание вычитают отдельно; плюсом идёт разгрузка

градирни.

4.7. Разобранные расчёты

Светлогорский ЦКК: две машины первого типа на паре. Обе работают на одной температурной паре — источник $40 \rightarrow 25$ °С, горячая вода $45 \rightarrow 85$ °С, подъём 45 °С — и отличаются масштабом.

Рисунок 13 Светлогорский ЦКК: одинаковые температуры, разный масштаб, баланс сходится у обеих машин



Пущена в декабре 2023 большая машина. Малая ждёт пусконаладки: у комбината реконструкция теплоисточника.

Таблица 22 Разобранные расчёты

Величина	SS 40C TP	SS 70B TP
Источник: расход / отбор	84,1 м ³ /ч / 1453 кВт	226,2 м ³ /ч / 3909 кВт
Пар 6,5 бар изб.: расход / тепло	3039 кг/ч / 2005 кВт	8098 кг/ч / 5312 кВт
Горячая вода: расход / тепло	75,0 м ³ /ч / 3458 кВт	200,0 м ³ /ч / 9221 кВт
Баланс $Q_{\text{г}} + Q_{\text{и}}$	3458 кВт	9221 кВт
Коэффициент ϕ / доля f	1,72 / 42 %	1,74 / 42 %
Источник по воде ($\rho = 1000$, $c = 4,18$)	1465 кВт, +0,8 %	3940 кВт, +0,8 %
Горячая вода по воде ($c = 4,19$)	3492 кВт, +1,0 %	9311 кВт, +1,0 %
Электропотребление машины	14,9 кВА, 0,4 % тепла	28,9 кВА, 0,3 % тепла

Расхождение около 1 % по воде — плотность: расход дан при рабочей температуре, а в расчёте взята вода 1000 кг/м^3 .

Сквозной пример: от исходных данных до годового эффекта. Учебный объект. Нужно 2500 кВт тепла, вода $60 \rightarrow 85$ °С, технология и горячее водоснабжение 7000 ч в год. Источник — обратная вода 35 °С, допустимо охладить до 30 °С, есть 8400 ч в год. Пар 6,5 бар изб., сухой насыщенный, свободен 8000 ч, конденсат возвращается при 90 °С.

Таблица 23 Разобранный расчёт: шаги

Шаг	Расчёт	Результат
1. Обратка	60 °C ≥ 35 °C по опросному листу	смесительный узел не нужен
2. Подъём	85 – 35	50 °C, зона рабочая
3. Коэффициент	интерполяция 46 °C → 1,62 и 55 °C → 1,50	φ ≈ 1,57
4. Хватит ли пара	2 × 85 – 30 + 12	нужно 152 °C, у пара около 168 °C — хватает
5. Греющее тепло	2500 / 1,57	Q _г = 1592 кВт
6. Отбор у источника	2500 – 1592	Q _и = 908 кВт, f = 36 %
7. Расход источника	908 / (1,163 × 5)	156 м³/ч при минимальной загрузке
8. Расход нагреваемой воды	2500 / (1,163 × 25)	86 м³/ч
9. Расход пара	1592 × 3600 / 2388	2400 кг/ч (прикидка 1,52 × 1592 = 2420)
10. Конденсат	равен расходу пара	2400 кг/ч, 80–100 °C
11. Часы	наименьшее из 8400, 8000, 7000	τ = 7000 ч
12. Выработка	2500 × 7000	17 500 МВт·ч = 15 047 Гкал
13. Сэкономлено тепла пара	908 × 7000	6356 МВт·ч = 5465 Гкал
14. Пар против бойлера	(3769 – 2400) кг/ч × 7000	около 9580 т пара
15. Топливо, η _к = 0,92	5465 / 0,92 / 7	около 849 т у. т., около 738 тыс. м³ газа

Проверка: 1592 + 908 = 2500 кВт; экономия 908 / 2500 = 36 % равна доле бесплатного тепла, как и должно быть. Коэффициент 1,57 оценочный: до выпуска проекта расходы берут из подбора завода. Если бы год посчитали по часам источника (8400), эффект вышел бы на 20 % больше реального.

4.8. Проверка чужого расчёта и спецификации

Присланный подбор проверяют за 15 минут калькулятором. Начинают с баланса, а не с экономики.

Невязка: $\delta = |Q_{г} + Q_{и} - Q_{т}| / Q_{т} \times 100 \%$. Перед этим всё переводят в киловатты: ккал/ч ÷ 860; TR × 3,517.

Пример. SS 80D P на 105 °C. Q_т = 7504 кВт; Q_и = 470 TR × 3,517 = 1653 кВт; Q_г = 5 342 616 ккал/ч ÷ 860 = 6213 кВт. $\delta = |6213 + 1653 - 7504| / 7504 = 4,8 \%$; φ = 7504 / 6213 = **1,21** при подъёме 105 – 31 = 74 °C. Это не брак: горячий режим, корпус теряет тепло. Но это повод письменно запросить у завода подтверждение и диаграмму цикла.

Что проверить в присланной спецификации

температуры источника: вход / выход	сходится ли с опросным листом
температуры нагреваемой воды: вход / выход	
тепловая мощность (Heating capacity)	делим на подведённое — получаем ϕ
холодопроизводительность, если заявлена	
подведённое тепло (Heat input) и расход пара	проверяем баланс: источник + подвод = выход
расходы по контурам, м³/ч	
потери давления в аппаратах	хватит ли напора насосов заказчика
габариты, вес отгрузочный и рабочий	выдержит ли перекрытие
фактор загрязнения, при котором считали	Standard = чистые трубки, запаса нет

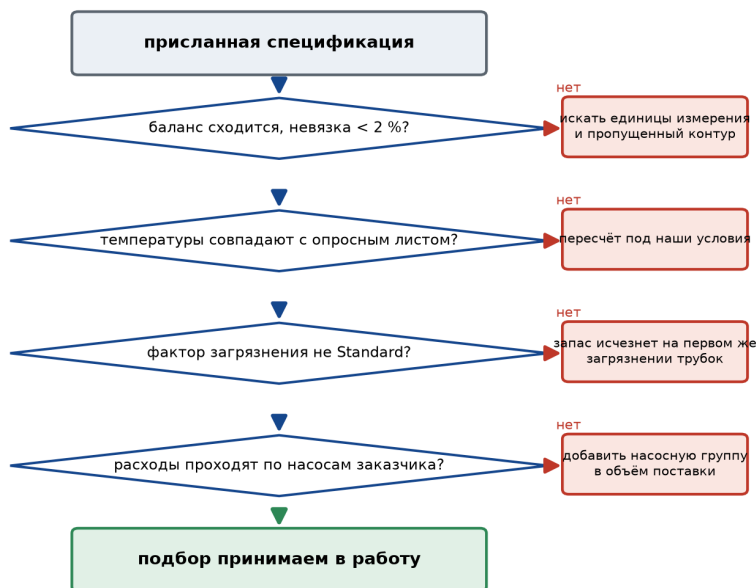
Таблица 24 Проверка чужого расчёта и спецификации

Величина	Норма	Признак ошибки
Невязка баланса δ	до 2 %; 2–5 % — вопрос заводу	больше 5 % — не та строка; больше 15 % — единицы
ϕ одноступенчатой машины	1,66–1,75 при подъёме до 46 °C; 1,2–1,5 при 55–75 °C	больше 1,75 или меньше 1,0
ϕ двухступенчатой	2,05–2,15	больше 2,2
Подъём	до 55 °C по каталогу	больше 55 °C без подтверждения завода
Расхождение по водяному контуру	до 1,5 %	больше 5 % — перепутаны расход или температуры
Скорость в патрубке	1,0–3,5 м/с	вне коридора — перепутан контур

Порядок проверки.

1. Перевести всё в кВт, выписать Q_t , Q_g , Q_i , посчитать δ . 2. Пересчитать каждый водяной контур по расходу и Δt . 3. Подъём — максимум минус минимум по четырём температурам. 4. Коэффициент — сверить с подъёмом по таблице раздела 4.3. 5. Фактор загрязнения (fouling factor): «Standard» означает чистые трубки; при воде открытой градирни или стоке нужен разделительный теплообменник и пересчёт. 6. Откуда взяты температура и расход источника: паспорт или журнал. 7. Есть ли часы потребителя и резервный сток. 8. Мощность — из подбора, не по индексу: два подбора SS 80D P дают 7504 кВт и 13 886 кВт при разных температурах. 9. На газе — по какой теплоте считали: у GS 20A P $\phi = 1,72$ по подведённому в генератор теплу и 1,46 по газу со счётчика (высшая теплота сгорания из спецификации). Верны обе цифры; ошибка — не сказать, какая приведена.

Проверка присланной спецификации: порядок



ПРИМЕЧАНИЕ

Вопрос, на который отвечают. Не «у вас ошибка», а «у меня невязка 4,8 %: 6213 + 1653 против 7504 — это потери корпуса на 105 °С или я неверно читаю Heat Input?»

Чек-лист раздела 4: расчёты

- ☐ Баланс $Q_{\text{г}} + Q_{\text{и}} = Q_{\text{т}}$ сведён, невязка до 2 % (до 5 % на горячих режимах — с подтверждением завода).
- ☐ Подъём посчитан от источника на входе до горячей воды на выходе; коэффициент соответствует подъёму.
- ☐ Для подъёма больше 55 °С есть подбор завода и диаграмма цикла.
- ☐ Температура греющей среды проверена оценкой $2 \times T_{\text{гв.вых}} - T_{\text{ист.вых}} + 12$ °С.
- ☐ Расходы всех контуров посчитаны и сверены со спецификацией; скорость в патрубках 1,0–3,5 м/с.
- ☐ Тип 2: расход холодной воды на сброс посчитан.
- ☐ Пар посчитан по полной энтальпии с фактической температурой конденсата; трасса конденсата в проекте.
- ☐ Насосы внешних контуров посчитаны отдельно от электропотребления машины.
- ☐ Годовой эффект — по наименьшему из трёх сроков, в МВт·ч, Гкал и т. у. т., с указанием КПД котельной.

Правило прохода: расчёт уходит в проект, когда баланс, расходы по воде и подъём сошлись между собой и со спецификацией завода, а годовой эффект посчитан по часам потребителя, а не по установленной мощности.

5. Требования к источнику тепла

Главный риск проекта под АБТН — источник низкопотенциального тепла оказывается не таким, как записано в опросном листе. Градирню под АБХМ проектируете вы, а источник — чужой действующий контур, который меняется по сменам и сезонам. Отсюда правило раздела: **замер важнее опросного листа**.

5.1. Какие источники подходят

Рисунок 16 Где на площадке лежит бросовое тепло: слева — низкопотенциальные источники для испарителя, в середине — высокопотенциальная греющая среда для генератора



Таблица 25 Какие источники подходят

Источник	Температура на входе	Что с ним не так	Что заложить
Оборотная вода градирни	30–40 °C	грязная; летом теплее, зимой холоднее; качество зависит от водоподготовки заказчика	разделительный теплообменник, своя водоподготовка
Технологический контур (вода процесса)	30–60 °C	врезка в действующий процесс требует остановки производства и согласования с главным технологом	согласованный график врезки, байпас машины
Сбросная и сточная вода после процесса	30–45 °C	агрессивность, взвесь	теплообменник из нержавеющей стали, предварительная фильтрация
Продувочная вода градирни	по режиму градирни	самая солёная вода в системе	разделительный теплообменник и водоподготовка обязательны
Обратная сетевая вода	40–60 °C по графику	температура привязана к графику теплосети; за обратку отвечает теплоснабжающая организация	согласование трёх сторон: заказчик, теплосеть, проектировщик

Источник	Температура на входе	Что с ним не так	Что заложить
Контур охлаждения ЦОД	30–45 °C	отвод тепла от серверов нельзя прерывать ни на минуту	гидравлическая развязка, машина параллельно штатной системе
Конденсат	—	чистый и стабильный, но его обычно уже возвращают в котельную	проверить, что он действительно «лишний»

Брошюра Thermax серии ХР называет среди источников также геотермальную воду и конденсацию дымовых газов.

Дымовые газы — две разные роли. Выхлопные газы **275–600 °C** (по брошюре серии ХР) — это греющая среда для генератора. Низкопотенциальным источником газы становятся только через конденсационный теплоутилизатор, который отдаёт тепло в водяной контур (раздел 6.3). В опросном листе это разные разделы.

5.2. Пять параметров источника

1. Температура на входе. От неё зависят достижимая температура выхода, тепловой коэффициент и типоразмер. В подборках Thermax источник на входе — от 30 до 60 °C, и чем он теплее, тем лучше. Нижнюю границу задаёт конкретный подбор: машина, посчитанная на 30 °C, при 25 °C может не выйти на заданную температуру. В расчёт идёт **минимальная устойчивая** температура за год, а не паспортная и не средняя.

2. Расход. Сколько тепла реально можно снять:

$$Q = V \times \rho \times c \times \Delta t \div 3600$$

где **Q** — тепловой поток, кВт; **V** — расход, м³/ч; **ρ** — плотность, кг/м³ (для воды 1000); **c** — теплоёмкость, кДж/(кг·K) (для воды 4,19); **Δt** — охлаждение источника в машине, K.

Пример из подбора Thermax SS 60D P: $399,9 \times 1000 \times 4,19 \times 8 \div 3600 = 3723$ кВт; в спецификации 3684 кВт, сходимость 1 %. В проект идёт расход при минимальной загрузке цеха, а не среднесуточный.

3. Стабильность. Источник описывают графиком, а не точкой: сутки, сезон (оборотная вода летом и зимой различается на десятки градусов), остановки линии и ремонты.

4. Чистота. Подборы Thermax считаются с фактором загрязнения (fouling factor) Standard — по условно чистой воде (раздел 5.4).

5. Круглогодичность. Тепловой насос окупается часами работы, а не мощностью.

Таблица 26 Пять параметров источника

Тип источника	Часов в году	Оценка
Технологический контур непрерывного производства	8000+	лучший случай
Оборотная вода круглогодичной градирни	7000–8000	очень хорошо
Контур охлаждения ЦОД	8760	очень хорошо
Обратная сетевая вода	5000–6000, сезонно	средне
Градирня, работающая только летом	2500–3500	плохо
Сезонный техпроцесс (сахар, консервы)	1500–2500	как правило, не проходит

5.3. Замер источника: минимальная программа

Международное энергетическое агентство называет первым барьером внедрения промышленных тепловых насосов то, что предприятия редко знают реальное теплотребление своих процессов. Нет графика — его получают замером.

Таблица 27 Замер источника: минимальная программа

Что мерить	Чем	Как долго	Зачем
Расход источника	накладной ультразвуковой расходомер	не меньше 7 суток непрерывно	увидеть провалы, которых нет в опросном листе
Температура на входе и выходе	два регистратора с записью	те же 7 суток, шаг 1 минута	реальный перепад и его колебания
Часы работы в году	журнал или АСУ ТП заказчика	год	без этого не считается окупаемость
Мутность, жёсткость, масло	лабораторный анализ	2–3 пробы в разное время	выбор фильтрации; масло на трубках убивает теплопередачу
Давление в точке врезки	манометр	разово	максимальное рабочее давление водяных контуров машины — 8,0 кгс/см ²

Почему семь суток. Короче — замер не попадёт в выходной, пересменок и ночную смену. На одном объекте недельный замер показал, что «постоянный» поток исчезает на четыре часа каждое воскресенье — на плановой промывке.

5.4. Качество воды, фильтрация и промежуточный теплообменник

Руководство Thermax задаёт по водяным контурам машины условия, которые проектировщик обязан обеспечить:

- **мутность не более 10 ppm** — иначе шлам оседает на трубках и под ним начинается подшламовая коррозия;
- вода не застаивается: при остановке больше чем на сутки её прокачивают через машину по 30 минут ежедневно, при длительном простое контур дренируют и оставляют машину сухой; при температуре площадки ниже 0 °C — дренируют и сушат трубки испарителя;
- анализ воды обоих водяных контуров — раз в три месяца.

Фильтрация. Первая причина недостаточного расхода в заводском перечне неисправностей — забитый грязевик в контуре источника, вторая — воздух в контуре. Отсюда минимум: грязевик на входе с манометрами до и после (ячейка — по нормам производителя насосов), воздухоотводчики в верхних точках. Признак загрязнения трубок в работе по руководству — разница между температурой воды на выходе и температурой сконденсировавшегося хладагента больше 3 °C; второй признак — рост перепада давления на аппарате при том же расходе.

Когда нужен промежуточный теплообменник. Прямое подключение допустимо, если источник — закрытый чистый контур. Разделительный теплообменник нужен, когда источник:

- оборотная вода **открытой** градирни — почти всегда;
- продувка градирни или сточный поток — всегда, из нержавеющей стали, с предварительной фильтрацией;

- контур, остановка которого недопустима (охлаждение серверов, турбогенератора) — гидравлическая развязка, свой насос, свой контур.

Цена развязки — температура. Машина получает воду на **3–5 К** холоднее, чем она есть в градирне, и эти градусы вычитаются из располагаемого температурного подъёма (lift) ещё до подбора.

Расчёт: что теплообменник делает с подъёмом.

Дано: подбор Thermax SS 40B TP — источник $30 \rightarrow 25$ °С, нагреваемая вода $60 \rightarrow 70$ °С, 1500 кВт. Источник — обратная вода открытой градирни, на площадке она 30 °С.

Ход:

1. Подъём по выходам без теплообменника: $70 - 25 = 45$ К.
2. С теплообменником машина получает $25-27$ °С, при охлаждении на 5 К выход из испарителя — $20-22$ °С.
3. Подъём по выходам: $70 - (20...22) = 48-50$ К.
4. Сверка с рабочей зоной одноступенчатой машины: по подборам Thermax это **34–58 К** с коэффициентом 1,57–1,71 (см. раздел 4).

Итог: подъём в рабочей зоне, но коэффициент и типоразмер для $25-27$ °С даст только новый подбор завода.

ВНИМАНИЕ

В опросный лист пишут температуру у патрубка испарителя, а не на градирне. Подбор на 30 °С при теплообменнике в проекте недействителен.

5.5. Если источник «пропадает»

Уставку реле расхода источника выставляют на 50–60 % расчётного расхода. Расход ниже — аварийный останов. После останова дольше трёх минут обязателен цикл разбавления раствора (dilution) — 20 минут без выработки тепла. Два-три таких события в сутки — и заказчик считает оборудование ненадёжным.

Таблица 28 Если источник «пропадает»

Ситуация	Решение в проекте
Температура гуляет на $5-8$ °С в сутки	штатно: машина отработывает регулированием; коэффициент считать по нижней температуре источника, а не по средней
Температура проваливается ниже 20 °С	буферная ёмкость или догрев от котла в эти часы — считать оба варианта
Поток исчезает целиком на несколько часов	буферный бак, второй источник или котёл как базовая мощность с тепловым насосом в роли экономайзера
Провалы неглубокие и короткие	машина считается на средний источник, в провалы растёт подача пара: нужен запас по пару и по регулируемому клапану
Источник исчезает на треть года	считать не машину, а котёл: честный отказ на обследовании дешевле недовольного заказчика после пуска

Расчёт: буфер на четыре часа. Тот же подбор SS 40B TP отбирает от источника около 607 кВт (расход около 105 м³/ч, охлаждение $30 \rightarrow 25$ °С). Источник пропадает на 4 часа.

1. Тепло, которое надо запасти: $607 \times 4 = 2428$ кВт·ч.

2. Объём воды при срабатывании 5 К: $2428 \times 3600 \div (4,19 \times 1000 \times 5) \approx 417 \text{ м}^3$ — то есть $105 \text{ м}^3/\text{ч} \times 4 \text{ ч}$.

Итог: буфер на несколько часов промышленного расхода — резервуар в сотни кубометров. Он оправдан против коротких провалов; на длинных дешевле догрев котлом.

ВАЖНО

Источник нельзя отключать ради машины, машина обязана отключаться, не трогая источник. Байпас мимо машины и резервный сток тепла (обычно та самая градирня) остаются в схеме всегда — см. разделы 6 и 7.

Чек-лист раздела 5: источник тепла

- ☐ Источник описан графиком: сутки, сезон, остановки технологии; есть замер не короче 7 суток или журнал АСУ ТП.
- ☐ В подбор передана минимальная устойчивая температура и расход при минимальной нагрузке, а не паспорт и не среднее.
- ☐ Часы работы в году посчитаны; источник с менее чем 3000 ч обоснован отдельно.
- ☐ Анализ воды выполнен: мутность $\leq 10 \text{ ppm}$ или предусмотрена фильтрация и водоподготовка.
- ☐ Решено, нужен ли разделительный теплообменник; если да — подбор сделан на температуру после него (минус 3–5 К).
- ☐ Грязевик с манометрами до и после, воздухоотводчики в верхних точках.
- ☐ Определено, что делает объект при пропадании источника: буфер, догрев, котёл или отказ.
- ☐ Назван ответственный за параметры источника со стороны заказчика.

Правило прохода: нет замера или графика источника — подбор не запускаем, проект не выпускаем.

6. Схемы включения

Машина во всех схемах одна и та же; меняется, откуда приходит низкопотенциальный поток и кому уходит горячая вода. Схему выбирают до подбора: от неё зависят температуры в опросном листе (см. раздел 3).

6.1. Постоянная часть любой схемы

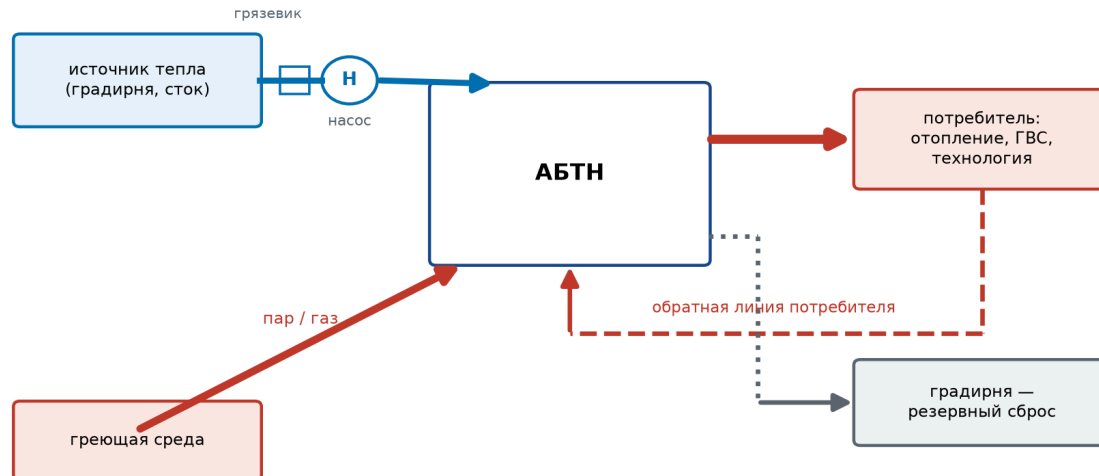
1. Низкопотенциальный источник → испаритель → обратно в свой контур, охлаждённым.
2. Нагреваемая вода → **последовательно абсорбер, затем конденсатор** → потребителю.
3. Греющая среда → генератор; конденсат или продукты сгорания — на выход.

Порядок «абсорбер, потом конденсатор» — заводское решение, а не выбор монтажника: вода забирает сначала тепло абсорбции, потом тепло конденсации и выходит самой горячей. В спецификациях Thermax число проходов указано отдельно по абсорберу и по конденсатору.

6.2. Базовая схема типа 1: бросовая вода → потребитель

Рисунок 17 Базовая схема включения АБТН первого типа: источник через грязевик и насос, греющая среда в генератор, продукт потребителю, градирня — резервный сброс

Базовая схема включения АБТН первого типа



Самая массовая схема: обратная вода круглогодичной градирни (обычно 40/30 °С), пар низкого давления от котельной или отбора турбины, потребитель — отопление, ГВС, технология или теплосеть.

Что важно для проектировщика.

- Машина встаёт **параллельно градирне**, а не вместо неё. Часть оборотной воды уходит в испаритель, охлаждается и возвращается в общий коллектор. Градирня работает на остаток нагрузки и на случай остановки машины.
- Расход на машину регулируют трёхходовым клапаном на подаче источника.

- Если потребитель перестал брать тепло, а процесс не терпит остановки машины, нужен аварийный сброс тепла продукта — на рисунке это градирня (пунктир).

Пример из брошюры Thermax: обратная вода градирни $40 \rightarrow 32$ °C отдаёт 0,4 единицы тепла, пар 8,0 бар изб. — 0,6, на выходе вода $35 \rightarrow 95$ °C, 1,0 единица. Пар закрывает 60 % нагрузки, бросовое тепло — 40 %.

Масштаб из мировой практики: муниципальная ТЭЦ в Китае, шесть машин по 30 МВт, градирни $40/30$ °C, пар 0,5 МПа, сетевая вода $90/70$ °C.

6.3. Тепловая сеть, ТЭЦ и котельная

Обратная сетевая вода как источник. Обратка приходит на станцию с температурой $40\text{--}60$ °C, и это огромный по расходу поток низкопотенциального тепла. Поток **разделяют**: часть идёт штатно на сетевые подогреватели, часть — в испаритель. Перед сетевыми подогревателями потоки снова смешиваются. Снятое тепло уходит на собственные нужды станции — ГВС зданий, подогрев химически обессоленной воды. Работа машины меняет температуру обратки, а за неё отвечает теплоснабжающая организация, поэтому схему согласуют три стороны.

Где искать тепло на ТЭС. В российском исследовании по парогазовым ТЭС (СПбПУ, 2012) источники сравнили по резерву экономии условного топлива:

Таблица 29 Тепловая сеть, ТЭЦ и котельная

Источник низкопотенциального тепла	Резерв экономии, тыс. т у. т. в год
Циркуляционная вода конденсатора паровой турбины	43,8...394,2
Обратная сетевая вода	21,0...123,5
Обессоленная вода охлаждения турбогенератора	2,6
Продувочная вода градирни	0,9...2,3

Исследование выполнено для парокомпрессионных насосов: схемы и порядок источников переносятся на абсорбционную машину, цифры коэффициента и окупаемости — нет. Вывод работы: эффективнее отпускать тепло **на собственные нужды станции**.

Два частных решения на станции:

- **охлаждение турбогенератора** → испаритель → ГВС станции. Охлаждение генератора должно работать непрерывно, независимо от спроса на горячую воду, поэтому параллельно испарителю ставят резервный теплообменник на технической воде;
- **продувка градирни** → испаритель → подогрев сырой воды перед химводоочисткой. Это сбросной поток (около 0,3 % расхода циркуляционной воды), его можно взять целиком, ничего не перестраивая. Разделительный теплообменник и водоподготовка обязательны.

Дымовые газы котельной. Цепочка из проработки Thermax под российские газовые котельные: **котёл** → **конденсационный теплоутилизатор** → **АБТН** → **тепловая сеть**. По теплопроизводительности котла, температуре и объёму уходящих газов определяют степень байпасирования, объём газов через утилизатор, количество конденсата и утилизируемое тепло $Q_{\text{ут}}$; по $Q_{\text{ут}}$ выбирают типоразмер АБТН.

Таблица 30 Годовой эффект по мощности машины

Мощность АБТН, кВт	1500	2000	3000	4000
Секций теплоутилизатора	3	4	4	5

Результат проработки — экономия топлива **12 %**, КПД котельной **до 106 %** по низшей теплоте сгорания (утилизатор забирает теплоту конденсации водяных паров). Утилизатор ставят **за дымососом, на нагнетании** — в газоходах или на эстакаде, так собирается тепло нескольких котлов. Закладывать схему рационально при новом строительстве или модернизации: врезка в действующий газовый тракт — самая дорогая часть работы.

6.4. Схема в технологию

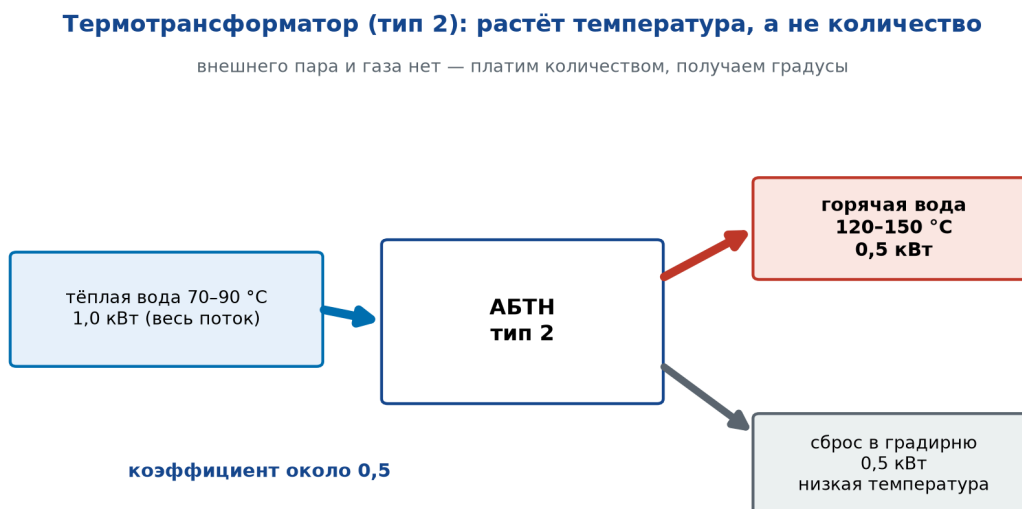
Технологический контур завода. Источник — вода самого процесса, теплее и стабильнее оборотной. Пример подбора Thermax GS 20A P: источник 60 → 50 °C, продукт 70 → 90 °C, 1 МВт на газе. Референсы Thermax: бумажная фабрика в Австрии (4400 кВт, пар 10 бар, нагрев 38 → 65 °C) и деревообрабатывающий завод там же (14 500 кВт на горячей воде 150 °C). Врезка в процесс — остановка производства и согласование с главным технологом.

Подогрев питательной воды котла. Питательную воду греют до 90–105 °C, чтобы удалить кислород, — обычно барботажем своего же пара. Тепловой насос делает это оборотной водой и паром и, по материалам Thermax, экономит до 40 % топлива. Потребитель гарантированный и круглогодичный — часто лучшая схема на промплощадке.

Центр обработки данных. Вода охлаждения серверных 30–45 °C идёт в испаритель, продукт 65–90 °C — на отопление, соседям или в теплосеть. Условия: машина стоит **параллельно** штатной системе охлаждения, через разделительный теплообменник и со своим насосом; её остановка не меняет ничего в контуре ЦОД. Отопление сезонное, а ЦОД греет круглый год, поэтому круглогодичный сток тепла (бассейн, теплицы, соседнее производство, подпитка теплосети) ищут заранее.

6.5. Схема типа 2: термотрансформатор

Рисунок 18 Термотрансформатор (тип 2): внешней греющей среды нет, половина тепла поднимается выше исходной температуры, половина уходит в градирню



Половина тепла поднимается выше исходной температуры, вторая половина уходит вниз — это плата за подъём.

У машины второго типа (heat transformer, абсорбционный термотрансформатор) внешнего высокопотенциального тепла нет. Один поток тёплой воды или пара машина делит сама: часть поднимает выше исходной температуры, остаток сбрасывает ниже. Каталог Thermax указывает для тепловых преобразователей горячую воду **до 160 °C**.

Отличия схемы от типа 1:

- бросовое тепло подводится и к генератору, и к испарителю; продукт отдаёт абсорбер — самое горячее место машины;
- **градирня обязательна**: конденсатор сбрасывает около половины подведённого тепла. Коэффициент — около 0,5 (расчётный 0,495, измеренный на действующем объекте 0,49);
- источник нужен горячий: по оценке Международного энергетического агентства — **выше 90–100 °C**;
- продуктом может быть пар: на двух известных объектах в Нидерландах — 145 °C и 130 °C.

Когда выбирать. На площадке нет дешёвого пара или газа, зато много тёплой воды 80–100 °C; нужен подъём выше, чем даёт тип 1 от этого источника; продуктом должен быть пар. Требования к материалам и герметичности здесь жёстче, чем у типа 1: машина работает примерно на 40 К горячее. Это не типовая поставка, а проект с обследованием: в мире таких машин меньше сотни.

6.6. Гибриды, каскады и связка с котлом

Каскад из двух абсорбционных машин. Одна ступень уверенно даёт подъём 34–58 К; 79 К возможно, но коэффициент падает до 1,21. Для подъёма 70–90 К машины ставят последовательно: первая поднимает воду от источника 30 °C до 65 °C, вторая берёт эту воду как свой источник и поднимает до 95 °C. Каждая работает в комфортной зоне 30–35 К с коэффициентом около 1,7.

Пример из референс-листа Thermax — три машины общей мощностью 10 МВт в Копенгагене, на паре, последовательно, геотермальный источник, нагрев до 85 °С.

Рисунок 19 Каскад: последовательно по продукту (А) или с общим источником (Б)

Схема А. Последовательно по продукту

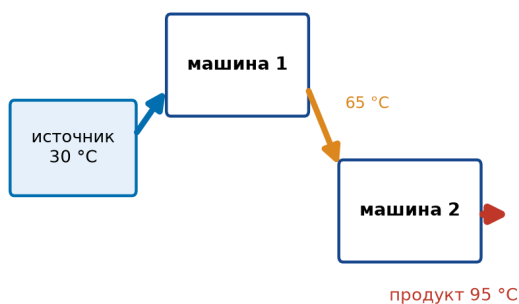
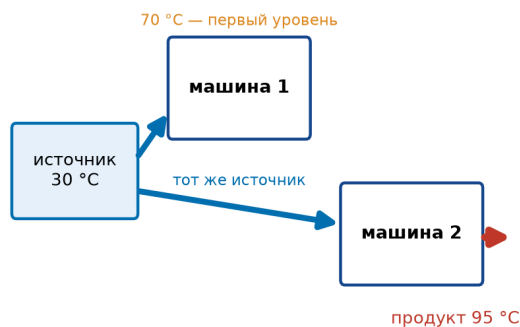


Схема Б. Общий источник



Каскад берут, когда за одну ступень подъёма не хватает. Плата — второй аппарат, второй фундамент и вдвое больше обвязки.

Что каскад стоит:

- общий коэффициент считают только так: полезное тепло на выходе второй машины ÷ сумма подведённого тепла обеих машин; среднее коэффициентов ступеней завышает результат на 15–20 %;
- место, вес и обвязка удваиваются; появляется промежуточный контур со своим насосом, расширительным баком и регулированием;
- остановка любой машины останавливает установку. Если это недопустимо — байпас второй ступени, и потребитель должен уметь принять 70 °С вместо 95 °С.

Каскад оправдан при большом числе часов, когда разница коэффициентов (1,7 против 1,21) перекрывает второе железо; при малом — выгоднее одна машина на пределе.

Гибрид: абсорбционный плюс электрический тепловой насос. У абсорбционной машины потолок 90–105 °С при коэффициенте около 1,7; у серийных электрических — по данным Международного энергетического агентства, в большинстве до 65 °С, но с коэффициентом 3–5. Гибридный насос Thermax на химическом заводе в Индии даёт 562 кВт горячей воды 110 °С и попутно холод 7 °С (около 30 % тепловой мощности); заявленный потолок технологии — 120 °С. Гибридом бывают и две отдельные машины в одном узле: абсорбционная держит базу на бросовом паре, компрессионная добирает верхние градусы — так проще в ремонте и гарантии. При российском соотношении цен электричества и топлива гибрид — решение про температуру, а не про экономию.

Связка с котельной. Самая частая конфигурация на объекте:

- **машина держит базу** — непрерывно, в расчётной точке; так она даёт свой коэффициент и набирает часы. Мощность — не по пику, а по той части нагрузки, что держится большую часть

года; базовый источник обычно закрывает 50–70 % годовой потребности при мощности заметно меньше пиковой;

- **котёл держит пики и резерв** и включается, только когда машина не держит температуру;
- машина и котёл — **параллельно** по потребителю на общем коллекторе, каждый может работать без другого;
- подмес от котла не должен поднимать температуру нагреваемой воды на входе в машину: иначе сработает защита по верхнему пределу в самый холодный день. Нужна гидравлическая развязка коллектора.

Наоборот нельзя: абсорбционная машина не любит малую нагрузку и частые пуски. Каждая остановка — цикл разбавления раствора на 20 минут.

Таблица 31 Дерево выбора конфигурации

Вопрос	Ответ → решение
Подъём	до 55 К — одна машина; 55–70 К — одна машина с потерей коэффициента или каскад, считать; больше 70 К — каскад или гибрид
Температура на выходе	до 90 °С — обычный АБТН; 90–105 °С — на пределе, проверить коэффициент; 105–120 °С — гибрид
Есть высокопотенциальное тепло	да — тип 1; нет, но есть тёплая вода выше 90 °С — тип 2
Часов в году	больше 6000 — можно каскад и гибрид; 3000–6000 — одна машина; меньше 3000 — скорее всего проекта нет
Нужен ли холод одновременно	да — chiller-heater (раздел 6.7)

6.7. Одна машина на два сезона: chiller-heater

Исполнение chiller-heater летом делает холод, зимой тепло; в одновременном режиме отдаёт оба продукта сразу. Для машины Heat Pump Chiller завод заявляет три режима — охлаждение, нагрев, одновременный — и экономию энергии до 32 % против раздельной схемы. Пример из брошюры: 210 TR холода и 2000 кВт тепла раздельно (абсорбционный чиллер плюс водогрейный генератор) требуют $736 + 3008 = 3744$ кг/ч пара, одна машина — 2558 кг/ч. Экономия 1186 кг/ч, или 31,7 %.

Что меняется в обязанности:

- контуров четыре: источник, потребитель холода, потребитель тепла, греющая среда, плюс конденсат;
- возвращается градирня — как сток тепла летом и на случай, когда потребитель тепла отключился;
- режим переключается не кнопкой, а **маршрутами потоков**: нужны переключающие клапаны с приводами на каждом маршруте и сезонная логика в автоматике;
- если греющая среда — выхлопные газы, в задании обязателен дымовой байпасный клапан: наличие, тип, управление;
- расходы в режимах разные: насосы — на худший случай или с частотным регулированием, с обоснованием расчётом;
- уставки защит в каждом режиме свои — в шите это два сохранённых профиля.

Каждое переключение — остановка с 20-минутным разбавлением и новый пуск, поэтому режим меняют **не чаще двух раз в год**, по календарю, с выездом наладчика.

Оправдано, если обе нагрузки настоящие и сопоставимы, греющая среда есть круглый год, места под вторую машину нет, а каждый режим набирает хотя бы 2500–3000 часов. **Не оправдано**, если один режим работает меньше 1500 часов, нагрузки различаются в разы или нужны предельные температуры — 105 °С по теплу или 5 °С по холоду.

6.8. Сравнение схем

Таблица 32 Сравнение схем

Схема	Источник → испаритель	Греющая среда	Потребитель	Главный риск
Градирня → потребитель	оборотная вода 40/30 °С	пар низкого давления	отопление, ГВС, теплосеть 90/70 °С	грязная вода, сезонность градирни
Обратная сетевая вода	часть обратки 40–60 °С	пар отбора	ГВС и подогрев воды станции	три стороны, обратка по графику
Дымовые газы котельной	вода от теплоутилизатора	газ	тепловая сеть	врезка в газовый тракт
Технологический контур	вода процесса 30–60 °С	пар, газ, горячая вода 150 °С	процесс 65–105 °С	остановка производства на врезку
ЦОД	вода охлаждения 30–45 °С	пар, газ	отопление, теплосеть	сезонный сток тепла
Тип 2	тёплая вода выше 90–100 °С	нет, тот же поток	горячая вода до 160 °С, пар	материалы, градирня на половину тепла
Каскад	источник 30 °С	пар в обе машины	95 °С	две машины, цепная надёжность
Chiller-heater	источник или контур охлаждения	пар, газ, выхлоп	холод летом, тепло зимой	переключения, четыре контура

Чек-лист раздела 6: схема включения

- ☐ Нагреваемая вода идёт абсорбер → конденсатор; машина стоит параллельно штатному стоку тепла источника (градирня, система охлаждения), а не вместо него; для обратной сетевой воды схема согласована с теплоснабжающей организацией.
- ☐ Есть байпас машины по источнику и путь сброса тепла продукта, если потребитель отключился.
- ☐ Для связки с котлом: машина — база, котёл — пики; подмес котла не поднимает вход в машину.
- ☐ Для каскада коэффициент посчитан по конечному продукту и сумме подведённого тепла; решён байпас второй ступени.
- ☐ Для chiller-heater у каждого режима есть часы (2500–3000+), переключающие клапаны с приводами и свой набор уставок.
- ☐ Для типа 2 источник выше 90–100 °С и градирня посчитана на половину подведённого тепла.

Правило прохода: не ясно, куда девается тепло при остановке машины или потребителя, — схема не готова.

7. Обязка

Общие правила обязки абсорбционной машины — фильтры, гибкие вставки, опоры, воздушники, фланцы ASME, промывка — те же, что у АБХМ, подробно — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АБХМ Thermax. Проектирование и обязка». Здесь только то, что у АБТН иначе. Главное отличие: у теплового насоса **нет своего стока тепла**. Охлаждение абсорбера и конденсатора — это вода потребителя, и всё, что останавливает её, бьёт по машине.

7.1. Контур источника

Температуры. В задание заводу — минимальная устойчивая температура у патрубка испарителя (после разделительного теплообменника, если он есть) и допустимая температура на выходе: до какой источник можно охладить, не сорвав процесс заказчика (см. раздел 5).

Байпас машины. Источник обязан работать, когда машина стоит. Запорная арматура на входе и выходе и байпас мимо машины — обязательны; расход на машину регулируют трёхходовым клапаном на подаче.

Контроль расхода. Реле расхода и дифференциальное реле давления на испарителе; уставки — **50–60 % расчётного расхода**, ниже машина уходит в полную остановку. Реле ставят на прямом участке; грязевик с манометрами до и после — на входе.

Защита от переохлаждения и замерзания. В терминах щита контур источника — это «охлаждённая вода» (chilled water). По датчику температуры на выходе из испарителя работает защита от замерзания (ANTIFREEZE TRIP) с полным остановом. Замерзание на АБТН — реальный сценарий: источник бывает холодным, а при малой нагрузке машина продолжает испарять. В застойных зонах вода замерзает первой, поэтому мёртвых тупиков в обязке испарителя не делают.

ВНИМАНИЕ

Насос источника машина не выключает и при аварии. При полном останове контакт разрешения насоса источника остаётся включённым, чтобы сохранить расход через трубки испарителя. Не заводите этот насос в общую аварийную блокировку «стоп всё».

Порядок пуска — по руководству Thermax: сначала насос источника (через испаритель), затем насос нагреваемой воды. Насос нагреваемой воды без работающего насоса источника не включают.

7.2. Контур нагреваемой воды

Остановка за минуту. Руководство требует, чтобы расход нагреваемой воды прекращался **через 1 минуту** после выключения машины. Иначе абсорбер продолжает охлаждать раствор, вакуум углубляется, температура хладагента падает, и неподвижная вода в трубках испарителя может замёрзнуть. Отсюда:

- насос нагреваемой воды управляется со щита машины через контакт разрешения пуска, его пускатель заведён сухим контактом на щит (состояния ON / OFF / TRIP);
- если насос принадлежит заказчику и остановить его по блокировке нельзя, на входе нагреваемой воды **обязателен клапан-отсекатель с приводом** от того же контакта. Без него защита не работает;

- реле расхода на выходе и дифференциальное реле давления вход-выход.

Минимальный расход. Реле расхода нагреваемой воды даёт только предупреждение: машина продолжает работать и реагирует уже по росту температуры на входе. Значит, падение расхода машина «увидит» поздно, и стабильный расход должен обеспечить сам контур: насос и клапаны потребителя не должны уводить его ниже уставки реле (50–60 % расчётного).

Температура на входе — коридор с двух сторон. Ниже уставки — машина уходит в разбавление (риск кристаллизации); выше уставки — тоже в разбавление с сигналом COOLING WATER INLET TEMPERATURE HIGH. Руководство запрещает опускать вход ниже 10 °C и предлагает держать его байпасом с трёхходовым клапаном; для теплового насоса рабочий минимум выше — его берут из спецификации машины. Подмес от котла или горячая обратка от потребителя, который перестал брать тепло, выводят машину за верхний предел.

Температура на выходе. Контроллер машины ведёт клапан греющей среды по своей ПИД-логике; по руководству Thermax после медленного открытия регулирование идёт по датчику температуры воды источника на выходе. По какому датчику и с какой уставкой регулируется выбранная модель, фиксируют в задании заводу и в наладочных уставках. Выход держится, если стабильны вход и расход нагреваемой воды. Если потребителю нужна точная температура подачи выше возможностей машины, последние градусы даёт котёл (раздел 6.6), а не уставки на панели.

Давление и температура. Вода до 105 °C — выше кипения при атмосферном давлении: контур закрытый, под избыточным давлением, с расширительным баком и предохранительными клапанами. Максимальное рабочее давление водяных контуров по спецификациям — 8,0 кгс/см². Объём трубного пространства машины для расчёта бака в спецификации нет — его запрашивают у завода. Контур ходит от холодного заполнения до 105 °C: компенсация температурных удлинений и изоляция всей трассы обязательны.

7.3. Греющая среда: пар или горячая вода

Паровой узел, конденсатная линия и греющий контур горячей воды устроены как у АБХМ — подробно в ЭХ-АРМ001-RU, разделы 6–7. У АБТН греющая среда — покупная энергия, поэтому требования жёстче:

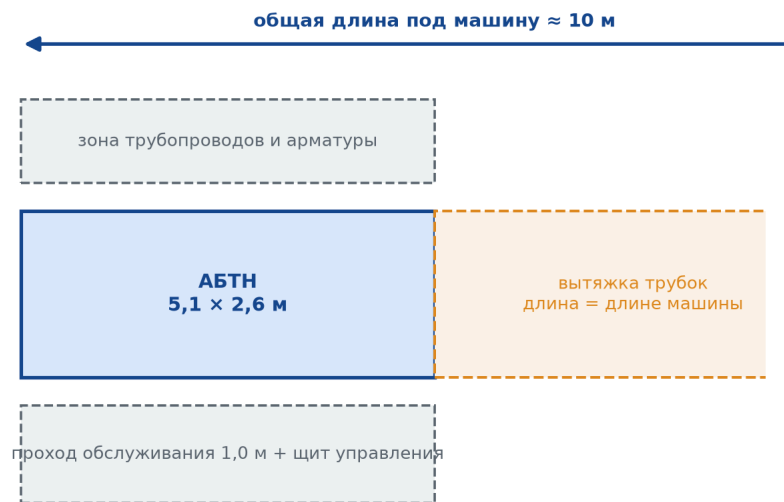
- **пар сухой насыщенный**, не перегретый: перегрев даёт локальный рост концентрации раствора и движение к кристаллизации. Пар перегретый — нужен пароохладитель;
- давление на входе постоянное, на проектном уровне: редуктор с настройкой на проектное давление, ручной изолирующий клапан (закрывается после выключения машины), регулирующий клапан с приводом 4–20 мА от щита машины. В подборках Thermax рабочее давление пара — от 3,0 до 8,0 бар изб., максимальное по спецификациям — 8,0 или 10,5 кгс/см² в зависимости от модели; проверяют оба значения;
- регулирующий клапан входит в комплект машины, но приезжает **в ящике**, а не смонтированным: место, прямые участки и обслуживаемый доступ к нему — в проекте;
- клапан открывается пошагово в течение 7 минут после пуска и всякий раз, когда генератор холоднее 70 °C, — это защита от гидроудара, а не неисправность;
- **конденсат** — четвёртый контур, о котором забывают: 80–100 °C на дренаже, давление на сливе 1,0 кгс/см². У SS 60D P это 8462,6 кг/ч. Бак, насос возврата и трубопровод — часть проекта.

Горячая вода тоже бывает греющей средой: в референсах Thermax — 100 °C и 150 °C. Для машин на газе (серия GS) горелка — часть машины, а газоснабжение и дымоход — по ЭХ-АРМ001-RU.

7.4. Компоновка и приборы учёта

Рисунок 20 Компоновка: с одного торца — свободная полоса под вытяжку трубок длиной с машину, вдоль — зона трубопроводов и проход обслуживания со щитом

Компоновка: место нужно не только под машину



Вес в работе 16,5 т на площадь 13 м² — это 1,3 т/м² на перекрытие. Считать до выбора этажа.

Подробно о машинном зале — ЭХ-АРМ001-RU, раздел 10. Для АБТН добавьте:

- **полоса под вытяжку трубок** с одного торца длиной с машину: под машину 5,1 × 2,6 м нужно около 10 м длины зала;
- все габариты и веса — с допуском $\pm 10\%$; фундамент и перекрытие — по **рабочему** весу плюс 10 %, а не по отгрузочному. У SS 80D P разница рабочего и отгрузочного веса — 16 т воды и раствора, которые при разрыве трубки окажутся на полу: приямок, порог и дренаж;
- зал отапливаемый, $+5...+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ — это условие подбора; вентиляция — по тепловыделениям: изолированная машина на 10 МВт всё равно греет помещение;
- изоляция машины и горячих трубопроводов — условие действительности подбора: без неё меняются мощность и расход греющей среды;
- место под вакуумный насос продувки (в подборах 0,75 кВт), подключение манометра, баллон азота с редуктором для длительных простоев.

Приборы учёта на трёх потоках. Расходомеры на источнике и нагреваемой воде, счётчик пара или газа, термометры и манометры на входе и выходе каждого контура, точка отбора конденсата. Без них на пуске не свести тепловой баланс и не посчитать фактический коэффициент — а именно его заказчик и покупал.

7.5. Узлы, которые отличают АБТН

Таблица 33 Узлы, которые отличают АБТН

Узел	Что поставить	Типовая ошибка
Вход источника	грязевик с манометрами, реле расхода и дифреле на 50–60 %	реле не на прямом участке, засорение грязевика не видно

Узел	Что поставить	Типовая ошибка
Байпас источника	запорная арматура и байпас мимо машины, трёхходовой клапан на подаче	машина стоит — встаёт охлаждение процесса
Насос источника	разрешение пуска со щита машины, первым в очереди	заведён в общую аварийную блокировку и гаснет при останове
Вход нагреваемой воды	клапан-отсекатель с приводом от щита, если насос чужой	насос заказчика не останавливается, риск замерзания испарителя
Контур нагреваемой воды	расширительный бак, предохранительные клапаны, компенсаторы на 105 °C	контур посчитан как «32/37 °C у чиллера»
Защита входа по низу	байпас с трёхходовым клапаном, минимум — по спецификации	вход проваливается, машина уходит в разбавление
Пар	пароохладитель при перегреве, редуктор, изолирующий и регулирующий клапаны	регулирующий клапан из ящика не нашёл места на паропроводе
Конденсат	бак, насос возврата, трубопровод на 80–100 °C	конденсат не учтён в смете и уходит в канализацию
Машинный зал	полоса под вытяжку трубок, отопление +5 °C, прямик	первая чистка трубок требует разбирать трубопроводы
Учёт	расход и две температуры на трёх потоках	на приёмке нечем доказать мощность

Чек-лист раздела 7: обвязка

- ☐ Источник имеет байпас мимо машины; насос источника не отключается общей аварийной блокировкой.
- ☐ Реле расхода и дифреле на обоих водяных контурах, уставки 50–60 % расчётного расхода.
- ☐ Расход нагреваемой воды прекращается в течение минуты после останова: управление насосом со щита или клапан-отсекатель.
- ☐ Коридор температуры нагреваемой воды на входе обеспечен с двух сторон; минимум взят из спецификации.
- ☐ Контур нагреваемой воды рассчитан на 105 °C: бак, предохранительные клапаны, компенсация, изоляция; объём машины запрошен у завода.
- ☐ Пар сухой насыщенный, давление постоянное; место под регулирующий клапан из комплекта машины предусмотрено.
- ☐ Конденсатный узел учтён.
- ☐ Полоса под вытяжку трубок, рабочий вес +10 %, зал +5...+45 °C.
- ☐ Приборы учёта на источнике, продукте и греющей среде.

Правило прохода: нет отсекаателя или управления насосом нагреваемой воды со щита машины — обвязку в рабочую документацию не выпускать.

8. Автоматика и режимы

Щит управления приходит с машиной, а связи машины с объектом — насосы, отсекающий, резервный сброс тепла, котельную, диспетчерскую — проектирует проектировщик автоматики. Общая логика пуска, останова и блокировок — в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка», раздел 11. Здесь — что меняется, когда продукт машины — горячая вода.

Названия на панели — чиллерные. Контроллер унаследован от холодильной машины: «охлаждённая вода» (chilled water) на панели — это вода источника в испарителе, «нагреваемая вода» — продукт, идущий через абсорбер и конденсатор к потребителю. Сигнализация COOLING WATER INLET TEMP. LOW означает низкую температуру нагреваемой воды на входе. В перечне сигналов для диспетчерской пишите название по физике, а рядом текст с панели.

8.1. Пуск, останов и разбавительный цикл

Порядок насосов. Инструкция Thermax повторяет дважды: сначала насос воды источника, потом насос горячей воды. Наоборот нельзя — абсорбер получит охлаждение без нагрузки на испаритель, и раствор переохладится.

Пуск. Через 7 с после команды на насос источника контроллер ждёт его обратную связь, затем 2 с подряд проверяет расход по реле протока (flow switch) и дифференциальному реле давления. Только после этого — команда на насос горячей воды и открытие отсекающего. Регулирующий клапан греющей среды открывается пошагово 7 минут и всякий раз, когда генератор холоднее 70 °C, — это защита от гидроудара. Пуск при закрытой задвижке потребителя кончается защитой по высокой температуре нагреваемой воды через 5 минут, поэтому разрешение на пуск в автоматике станции — по фактическому расходу у потребителя.

Останов. По команде STOP машина уходит в разбавительный цикл (dilution): концентрация и температура раствора выравниваются по аппаратам, чтобы при остывании раствор не кристаллизовался. Длительность — 20 минут, защита в контроллер.

Таблица 34 Пуск, останов и разбавительный цикл

Время после STOP	Действие машины
сразу	закрывается клапан греющей среды, снимается разрешение вентилятору градирни
+4 мин	снимается разрешение насосу горячей воды, закрывается отсекающий
+20 мин	останавливается насос абсорбента, снимается разрешение насосу источника

ВНИМАНИЕ

Горячий контур после останова — к замерзанию испарителя. Расход нагреваемой воды должен прекратиться через 1 минуту после выключения машины. Иначе абсорбер продолжает охлаждать раствор, вакуум углубляется, хладагент резко остывает, и вода в трубках испарителя может замёрзнуть. Если насос горячей воды принадлежит заказчику, на входе нагреваемой воды ставят отсекающий с приводом от щита машины.

Аварийные остановки. Полная остановка (TOTAL SHUTDOWN) — по отказу насоса или реле протока источника, защите от замерзания, отказу насоса абсорбента: всё стоп, но **разрешение насосу источника остаётся**, чтобы вода в испарителе не замёрзла. Логика станции не должна гасить этот насос по аварии машины. Остановка с разбавлением — по температурам нагреваемой

воды на входе и генератора. Сигнализацию сняли в пределах 3 минут — разбавление не обязательно, позже — обязательно.

Пропадание питания — самая опасная авария: циркуляция встала, раствор горячий и крепкий. Перерыв до 3 минут — пуск без разбавления; дольше — разбавление обязательно; дольше 30 минут — после разбавления проверка на кристаллизацию. Цикл декристаллизации занимает порядка 8 часов, процедуру для модели запрашивают у завода.

Что из этого следует для проекта:

- клапан греющей среды закрывается при пропадании питания;
- насос горячей воды заказчика, запитанный от другой секции, не должен гонять воду через обесточенную машину — насос в той же секции или отсекающий контур;
- резервное питание щита на разбавление — по ЭХ-АРМ001-RU, раздел 11.

Рисунок 21 После аварийного события первый шаг всегда один — снять подвод тепла; дальше порядок зависит от того, успела ли машина пройти разбавление

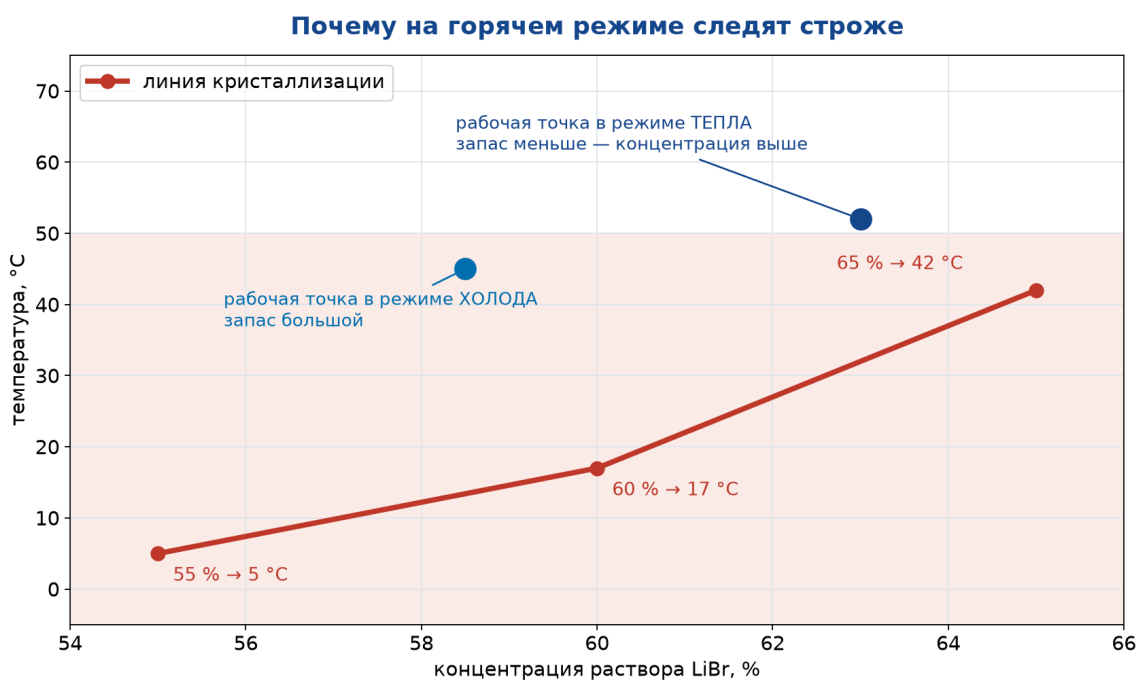


Слева направо — по нарастанию риска: чем меньше машина успела разбавиться, тем осторожнее пуск.

8.2. Защиты

Кристаллизация. По инструкции Thermax раствор LiBr концентрацией 55 % кристаллизуется при 5 °C, 60 % — при 17 °C, 65 % — при 42 °C. От 60 до 65 % — уже 25 градусов. У теплового насоса абсорбер охлаждается не водой градирни 30–32 °C, а горячей водой потребителя 50–60 °C. Горячий раствор поглощает пар хуже, машина работает на более крепком растворе, и запас до кристаллизации меньше, чем у холодильной машины.

Рисунок 22 Линия кристаллизации раствора LiBr: в режиме тепла рабочая точка ближе к ней, чем в режиме холода



Чаще всего раствор застывает в низкотемпературном теплообменнике, а его охлаждает в конечном счёте нагреваемая вода. Вывод инструкции: **чтобы не допустить кристаллизации, контролируют температуру входящей нагреваемой воды.**

Машина защищает себя сама: контроллер считает запас до кристаллизации и при его нехватке управляет клапаном греющей среды только по защите, игнорируя запрос на мощность. Дополнительно — уровень раствора в абсорбере по электродам, температура генератора и пара. Поэтому «не выходит на мощность» — не всегда неисправность: лечится это температурой воды на входе, а не уставками.

Таблица 35 Защиты

Защита	Порог	Реакция машины	Что закладывает проект
Минимальный расход источника	реле протока и дифреле, 50–60 % расчётного расхода	полная остановка	реле с прямыми участками, грязевик, байпас источника
Обратная связь насоса источника	7 с	полная остановка	сухой контакт «работа» в щит машины
Расход нагреваемой воды	реле протока	только предупреждение	блокировку по фактическому расходу в автоматике станции
Нагреваемая вода на входе, низ	по инструкции не ниже 10 °C; рабочий минимум — по спецификации	разбавление	трёхходовой клапан, байпас
Нагреваемая вода на входе, верх	уставка модели	разбавление	резервный сброс тепла, без подмеса от котла
Генератор, пар	уставки модели	закрытие клапана, разбавление	клапан с приводом 4–20 мА от щита машины

Порог 10 °С инструкция унаследовала от холодильной редакции; для теплового насоса рабочий минимум существенно выше. Защита по нижней температуре не действует, пока генератор холоднее 70 °С, но через 30 минут после пуска включается в любом случае. Первые полчаса температуру воды на входе держит автоматика станции.

ВНИМАНИЕ

По расходу горячего контура машина среагирует поздно. Реле протока нагреваемой воды даёт только предупреждение. Машина остановится, лишь когда вырастет температура на входе, и эти минуты раствор крепнет. Блокировка по расходу и температуре у потребителя — работа проекта.

Отдельной защиты «источник слишком холодный» нет: при провале источника падает мощность. Подбор ведут по минимальной устойчивой температуре источника за год (раздел 5), а температуру и расход источника выводят в диспетчерскую.

8.3. Регулирование мощности

Мощность задаёт клапан греющей среды, который контроллер ведёт по ПИД-закону (PID — пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование) сигналом 4–20 мА. По инструкции Thermax датчик регулирования — температура воды источника на выходе. Температуру горячей воды потребителю машина напрямую не держит, её держит схема:

- **температура нагреваемой воды на входе** — главный рычаг: производительность машины падает с её ростом. В схемах с разделением потока расход на машину регулируют трёхходовым клапаном на подаче с уставкой по этой температуре;
- **стабильный расход** в горячем контуре, без ступенчатых переключений у потребителя;
- **доводка** котлом, если потребителю нужно горячее, чем даёт машина (раздел 8.5).

Пример. Машина 1000 кВт тепла, подъём 46 °С, коэффициент 1,62 (для показа метода). Греющей среды нужно $1000 / 1,62 = 617$ кВт. Если потребитель захочет воду на 9 градусов горячее, подъём станет 55 °С, коэффициент — 1,50, и греющей среды понадобится $1000 / 1,50 = 667$ кВт, на 50 кВт больше. Лишний градус оплачивается паром и запасом до кристаллизации, уставки на панели его не дадут.

Наладочные уставки ПИД записывают и прикладывают к паспорту машины: колебания температуры на выходе чаще всего дают перепады расхода и нагрузки у потребителя, а не регулятор.

8.4. Переход между сезонами у машины «холод — тепло»

Машина «холод — тепло» (chiller-heater) летом делает холод, зимой тепло, в одновременном режиме — оба продукта. Смена режима — это останов с разбавлением (20 минут) и пуск с медленным открытием клапана (7 минут). Поэтому переключают **два раза в год по календарю**, а не по погоде.

Что закладывают в автоматику:

- **два профиля уставок** в шите: температуры нагреваемой воды, генератора и пороги защиты от кристаллизации в двух режимах разные;
- **порядок насосов сохраняется:** сначала насос через испаритель, потом через абсорбер и конденсатор;
- **переключающие клапаны с приводами** на каждом маршруте и проверка их положения по конечным выключателям, а не по команде;

- **насосы** на худший из режимов или с частотным регулированием;
- **градирня как летний сток** излишка тепла.

ВАЖНО

Порядок переключения конкретной модели — только от завода. Ни инструкция Thermax по АБТН, ни брошюры серии ХР механику переключения внутри машины не описывают. Порядок запрашивают у завода и вносят в паспорт машины.

8.5. Увязка с тепловой сетью и котельной: кто ведущий

Ведущий — тепловой насос, котёл держит пики и резерв. Машина не любит низкую нагрузку и частые пуски: каждый пуск — 7 минут выхода клапана, каждая остановка — 20 минут разбавления без тепла.

Пример. Пик площадки 6000 кВт, средняя за отопительный период 3200 кВт, летний минимум 1500 кВт. Машина на 3000 кВт закрывает летний минимум и большую часть отопления, котёл на 3500 кВт добирает пик. Машина набирает около **8000 ч** в год, а не 1500, как при подборе на пик.

Что закладывают в схему:

1. Машину и котёл — **параллельно** через общий коллектор. 2. **Приоритет машины:** котёл включается, только когда машина не держит температуру. 3. **Без подмеса в обратку машины:** иначе защита по верхней температуре уведёт её в разбавление как раз в пик. 4. **Летний сток:** тепловая сеть летом «наедается». Резервная градирня, сухая охладительная установка или буфер — в проекте, а не на усмотрение оператора. 5. **Байпас источника:** источник работает, когда машина стоит.

Второй порт RS-485 контроллера работает по Modbus RTU **только на чтение**. Пуск и останов со станции — дискретным сигналом на клеммы щита; перезапуск — не раньше конца разбавления.

8.6. Сигналы в диспетчерскую

Таблица 36 Сигналы в диспетчерскую

Сигнал	Тип	Направление
Работа / отказ насоса источника и насоса нагреваемой воды	сухие контакты	в щит машины
Разрешение насосу источника, насосу нагреваемой воды с закрытием отсекавателя, вентилятору градирни	сухие контакты	из щита машины
Клапан греющей среды	4–20 мА	из щита машины
Дистанционный пуск и останов	дискретный	в щит машины
Статус, сигнализации, температуры, расходы	Modbus RTU, чтение	в диспетчерскую

В диспетчерскую выводят не только «авария», но и «отклонение»: статус (работа, разбавление, полная остановка), температуры и расходы трёх контуров, переходы под защиту от кристаллизации, данные узлов учёта (раздел 9). Архив параметров — основа для разбора любого спора о мощности.

Чек-лист раздела 8: автоматика и режимы

- ☐ Порядок насосов: сначала источник, потом нагреваемая вода; сухие контакты насосов заведены в щит машины.
- ☐ Расход нагреваемой воды прекращается через 1 минуту после останова и при пропадании питания.
- ☐ Логика станции не гасит насос источника по аварии машины и не перезапускает её до конца разбавления.
- ☐ Блокировка по фактическому расходу и температуре у потребителя заложена в автоматике станции.
- ☐ Температура нагреваемой воды на входе удерживается в пределах уставок модели.
- ☐ Клапан греющей среды 4–20 мА от щита машины, закрывается без питания.
- ☐ Котёл параллельно, приоритет машины, без подмеса в её обратку; записано, куда уходит тепло летом.
- ☐ Для машины «холод — тепло»: два профиля уставок, концевики на переключающих клапанах, порядок от завода в паспорте.

Правило прохода: хоть один пункт пуст — раздел автоматизации выдавать рано.

9. Российские нормы

Отдельного свода правил на абсорбционный тепловой насос нет. Машина попадает под те же документы, что и любое теплогенерирующее оборудование с паром, газом и горячей водой. Общая нормативная часть — пар, газ, оборудование под давлением, электрика, оформление — собрана в руководстве ЭХ-АРМ001-RU «АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка», раздел 13. Здесь — что специфично для АБТН и на что смотреть в первую очередь.

9.1. Что специфично для АБТН

Горячая вода — продукт, а не служебный контур. Нагреваемая вода уходит в тепловую сеть, на горячее водоснабжение или в технологию. Обычная температура на выходе — до 90 °С, предел одноступенчатой машины — 105 °С. Исполнение «только нагрев» даёт горячую воду до 170 °С. Граница из руководства по АБХМ: трубопровод горячей воды выше 115 °С попадает под ФНП ОРПД. Значит, контур машины на 90–105 °С под них обычно не попадает, а машина «только нагрев» на высокую температуру — попадает, со всеми требованиями к трубопроводам, арматуре и предохранительным устройствам.

Пар как греющая среда. Паропровод с паром выше 0,07 МПа — оборудование под избыточным давлением по ФНП ОРПД (приказ Ростехнадзора № 536). Требования к паровому узлу и предохранительным клапанам те же, что для паровой АБХМ (ЭХ-АРМ001-RU, разделы 6 и 13).

Газ как греющая среда. Тепловой насос прямого горения — газоиспользующее оборудование: газопровод, рампа и помещение по ФНП по сетям газораспределения и газопотребления (приказ № 531) и СП 62.13330. Машина, которая выдаёт тепло в сеть, по функции близка к котельной, поэтому применимость СП 89.13330.2016 согласуйте с экспертизой на старте.

Присоединение к тепловой сети. Когда машина отдаёт тепло в чужую сеть, параметры присоединения — температурный график, давление, точка подключения, учёт на границе — задаёт теплоснабжающая организация в технических условиях. Конкретные документы по присоединению зависят от того, кто владелец сети; их перечень берут из технических условий, а не из этого руководства.

Учёт тепловой энергии. У АБТН узел учёта нужен не только на границе с сетью. Без учёта по каждому контуру через год невозможно доказать заявленную экономию и разобрать спор о мощности. На паровой машине узел учёта пара ставят на вводе в машину (см. раздел 7).

Пример: что должны показать узлы учёта. Машина в одновременном режиме: вода источника 24 → 17 °С, нагреваемая вода 50 → 70 °С, тепло потребителю 1068 кВт, холод 409 кВт (данные подбора для показа метода). Расход воды через 1 К перепада: 1 м³/ч несёт 1,163 кВт.

1. Расход нагреваемой воды: $1068 / (1,163 \times 20) = 45,9 \text{ м}^3/\text{ч}$. 2. Расход воды источника: $409 / (1,163 \times 7) = 50,2 \text{ м}^3/\text{ч}$. 3. Тепло греющей среды по балансу: $1068 - 409 = 659 \text{ кВт}$. 4. Тепловой коэффициент: $1068 / 659 = 1,62$.

Если узлы учёта на объекте дают сумму подвода и тепла источника, отличную от тепла потребителю: до 2 % — норма, 2–5 % — вопрос заводу, больше 5 % — ошибка в измерениях или единицах.

Отсюда требование к проекту: расходомер и два датчика температуры на каждом из трёх контуров, на прямых участках, с выводом в диспетчеризацию (раздел 8.6).

Таблица 37 Что специфично для АБТН

Документ	Что из него берём для АБТН
ФНП ОРПД (приказ Ростехнадзора № 536); ТР ТС 032/2013; 116-ФЗ	пар выше 0,07 МПа и горячая вода выше 115 °С: трубопроводы, предохранительные устройства, паспорт, испытания
ФНП по сетям газораспределения и газопотребления (приказ № 531); СП 62.13330	газопровод, рампа, пуск газа, помещение — для машин прямого горения
СП 89.13330.2016	машина на газе в роли источника тепла — применимость согласовать с экспертизой
СП 60.13330.2020	контуры холода у машины «холод — тепло» и резервной градирни
СП 73.13330.2016	гидравлические испытания контуров
СНиП 3.05.05-84 и его актуализированная редакция	монтаж и испытания технологических трубопроводов промышленного объекта; применимость — по договору и проекту
СП 131.13330	климат для расчёта резервной градирни или сухой охлаждающей установки
ПУЭ	щит машины, кабели, приводы, насосы контуров
ГОСТ 21.205, ГОСТ 21.208	обозначения на схемах и КИП

ВНИМАНИЕ

Проверьте действующую редакцию. ФНП № 531 и № 536 действуют до 01.01.2027. На момент выпуска проекта проверьте, какой акт их заменил.

9.2. Состав проекта

Проект под тепловой насос делается по тем же правилам, что под абсорбционную холодильную машину. Отличия — в контурах, учёте и автоматике.

Таблица 38 Состав проекта

Раздел	Что в нём специфично для АБТН
Тепломеханические решения	три контура: источник, нагреваемая вода до 105 °С (компенсация, изоляция, расширительный бак), греющая среда; байпас источника; резервный сброс тепла; узлы учёта по контурам
Пар и конденсат (для паровой машины)	паропровод, конденсатопровод, расчёт предохранительных клапанов
Газоснабжение и дымоудаление (для газовой машины)	газовый ввод, рампа, дымоход — по ЭХ-АРМ001-RU
Строительная часть и конструкции	пятно и высота +10 % к данным спецификации, полоса под выемку трубок длиной с машину, фундамент по рабочему весу +10 %
Отопление и вентиляция зала	температура в зале +5...+45 °С — условие действительности подбора
Автоматизация	пять полевых блокировок, 4–20 мА на клапан, связь с котельной, диспетчеризация (раздел 8)
Электроснабжение	напряжение 380 или 415 В по спецификации; суммарные кВА машины; насосы контуров отдельно
Водоподготовка	обработка обоих водяных контуров, мутность циркуляционной воды не выше 10 ppm

Чек-лист раздела 9: нормы и состав проекта

- ☐ Определено, попадает ли контур горячей воды под ФНП ОРПД (выше 115 °С) и паропровод (выше 0,07 МПа).
- ☐ Для газовой машины согласована с экспертизой применимость СП 89.13330.2016.
- ☐ Получены технические условия теплоснабжающей организации на присоединение и учёт на границе.
- ☐ На каждом из трёх контуров — расходомер и две температуры, данные выведены в диспетчеризацию.
- ☐ Проверена действующая редакция ФНП на дату выпуска проекта.
- ☐ В составе проекта есть все разделы таблицы 9.2, включая водоподготовку обоих контуров и отопление зала.

Правило прохода: хоть один пункт пуст — проект на экспертизу отдавать рано.

10. Самопроверка

Раздел для того, кто выпускает проект, и для того, кто его проверяет. Сначала — ошибки, которые встречаются чаще всего, потом — вопросы, которые задают на защите расчёта, и в конце — итоговый чек-лист.

10.1. Типичные ошибки проекта АБТН

Таблица 39 Типичные ошибки проекта АБТН

Ошибка	Чем грозит	Как правильно
Температура источника взята по паспорту или на пике	Зимой и в ночную смену машина не выходит на мощность	Минимальная устойчивая температура из журнала или АСУ ТП за 12 месяцев (раздел 3)
Подъём посчитан от обратной воды, а не от источника	Подъём занижен, коэффициент завышен, мощность не подтвердится	Подъём = температура горячей воды на выходе минус температура источника на входе (раздел 4)
Тепловой коэффициент вне коридора: у одноступенчатой выше 1,75 или ниже 1,0	Ошибка в единицах или в строке подвода тепла, неверная экономика	Проверить баланс: тепло потребителю = тепло источника + тепло греющей среды, невязка до 2 %
Мощность взята по индексу модели	Недобор в разы: SS 80D даёт 13 886 кВт при 90 °C и 7504 кВт при 105 °C	Мощность только из подбора под ваш режим
Не предусмотрен сток тепла на лето	Потребитель отключился, машина уходит в разбавление и стоит	Резервная градирня, сухая охладительная установка или буфер на остаток мощности (раздел 8.5)
Абсорбер и конденсатор запитаны параллельно	Температура на выходе ниже расчётной, причину ищут внутри машины	Только последовательно: абсорбер, затем конденсатор (раздел 7)
Прямая врезка в контур охлаждения ЦОД или технологии	Любая проблема машины становится проблемой процесса заказчика	Разделительный теплообменник, свой насос, отключение машины без последствий (раздел 6)
Оборотная вода открытой градирни подана в испаритель без разделителя	Трубки испарителя зарастают за сезон: подбор сделан по чистым трубкам	Разделительный теплообменник; мутность не выше 10 ppm
В машину отобрано больше половины оборотного потока без пересчёта градирни	Режим оборотного цикла ломается	Расчёт температуры смеси; больше 50 % — совместный расчёт с градирней
Насос нагреваемой воды не останавливается по команде машины	Замерзание воды в испарителе после останова	Отсекатель с приводом от щита машины; расход прекращается через 1 минуту (раздел 8.1)
Котёл подмешивает воду в обратку машины	Защита по верхней температуре, разбавление в пик нагрузки	Параллельно через коллектор, приоритет машины (раздел 8.5)
Машина взята на пиковую нагрузку	Частые пуски и остановки, малые часы, плохая окупаемость	Машина на базу, котёл на пики и резерв
В задании — управление машиной из АСУ ТП по Modbus	На пуске выясняется, что порт работает только на чтение	Пуск и останов дискретным сигналом, Modbus для мониторинга
Фундамент по отгрузочному весу, габарит без допуска	Недобор нагрузки, машина не проходит в проём	Рабочий вес +10 %, габарит +10 % по допуску спецификации

Ошибка	Чем грозит	Как правильно
Машина без изоляции, зал без отопления	Подбор недействителен, гарантии по мощности нет	Изоляция машины и зал +5...+45 °C — условия подбора

Коридоры, по которым ошибку видно за пятнадцать минут. Переведите всё в киловатты и сверьте расчёт с таблицей. Расхождение на любой строке — сначала выясните, ошибка это расчёта или исходных данных: первое обсуждают с тем, кто считал, второе — с заказчиком.

Таблица 40 Коридоры для быстрой проверки расчёта

Величина	Нормальный коридор	Признак ошибки
Невязка теплового баланса	до 2 %	больше 5 %
Тепловой коэффициент, одна ступень	1,66–1,75 при подъёме до 46 °C	больше 1,75 или меньше 1,0
Тепловой коэффициент, две ступени	2,05–2,15	больше 2,2
Подъём температуры	до 55 °C по каталогу	больше 55 °C без подтверждения завода
Расхождение по водяному контуру	до 1,5 %	больше 5 %
Скорость воды в патрубке	1,0–3,5 м/с	вне диапазона — перепутан контур
Доля отбираемого обратного потока	до 0,5	больше 0,5 без пересчёта градирни

10.2. Частые вопросы

Откуда коэффициент 1,7, если в спецификации завода его нет? Из баланса. Коэффициент равен отношению тепла потребителю к подведённому теплу, и обе строки есть в спецификации: Heating Capacity и Heat Input. Теоретически тепловой коэффициент равен единице плюс холодильный коэффициент той же машины. У одноступенчатой машины на бромистом литии холодильный — 0,70–0,75, отсюда тепловой — 1,70–1,75.

Почему для одной машины в одном расчёте 1,72, а в другом 1,46? Это разные коэффициенты. 1,72 — по строке подведённого тепла, эффективность цикла. 1,46 — по расходу газа со счётчика, эффективность установки с учётом горелки и разницы между высшей и низшей теплотой сгорания. В экономику идёт 1,46, в описание цикла — 1,72. Для машин на паре такой развилки нет.

Почему подъём считают от температуры источника, а не от обратной воды? Подъём — работа машины от самой холодной точки входа до самой горячей точки выхода. Обратная вода приходит в абсорбер тёплой, но тепло в неё вкладывается начиная от уровня источника. Считать «выход минус обратка» — занижить подъём вдвое и получить коэффициент, которого не будет.

Почему между градирней и машиной стоит теплообменник? Это лишние градусы. Лишние 2–4 градуса учитываются в подборе. Завод считает машину по фактору загрязнения Standard, то есть по чистым трубкам, а обратная вода открытой градирни чистой не бывает. Без разделителя трубки испарителя зарастут за сезон.

Куда девается тепло летом, когда отопление отключено? На резервный сток: градирню или сухую охлаждающую установку на остаток мощности. Без него машина упирается в верхний предел температуры нагреваемой воды на входе и уходит в разбавление, а пар тратится впустую.

Почему годовая экономия посчитана по 4600 часам, а источник работает 8400? Выработка ограничена наименьшим из трёх: часами источника, часами потребителя тепла и часами греющей среды. Если потребитель — отопление на 4600 часов, считать по источнику — зависеть экономии почти вдвое.

Почему одна и та же модель на двух объектах даёт разную мощность? Индекс модели — типоразмер корпуса, а не мощность. SS 80D даёт 13 886 кВт при выходе 90 °С и 7504 кВт при выходе 105 °С. Мощность берут только из подбора под конкретный режим.

Можно ли управлять машиной из нашей АСУ ТП по Modbus? Читать — да, второй порт RS-485 отдан под Modbus RTU. Управлять — нет, порт только на чтение. Пуск и останов извне — дискретным сигналом на клеммы щита при дистанционном режиме.

Почему нельзя переключать «холод — тепло» автоматически по погоде? Каждое переключение — остановка с 20-минутным разбавлением и новый пуск с пошаговым открытием клапана. Переключают два раза в год по календарю.

Зачем изолировать машину и отапливать зал, если машина горячая? Тепло с корпуса уходит в воздух зала, а не потребителю. В примечаниях спецификации прямо сказано: подбор действителен только для изолированной машины и при температуре в зале +5...+45 °С. Без этого нет гарантии по мощности.

10.3. Чек-лист проверки проекта

Исходные данные и подбор

- ☐ Температура источника — минимальная устойчивая за год из журнала или АСУ ТП, а не паспортная.
- ☐ Расход источника взят при минимальной загрузке производства.
- ☐ Подъём посчитан от температуры источника на входе до горячей воды на выходе.
- ☐ Тепловой коэффициент в физическом коридоре, баланс по спецификации сходится с невязкой до 2 %.
- ☐ Мощность и расходы взяты из подбора под ваш режим, а не по индексу модели.
- ☐ Годовая выработка посчитана по наименьшему из часов источника, потребителя и греющей среды.

Схема и обвязка

- ☐ Абсорбер и конденсатор включены последовательно.
- ☐ Есть байпас источника; источник работает, когда машина стоит.
- ☐ Загрязнённый источник подан через разделительный теплообменник.
- ☐ Предусмотрен сток тепла на лето и при отключении потребителя.
- ☐ Контур нагреваемой воды: расширительный бак, компенсация, изоляция, отсекающий на входе с приводом от щита машины.
- ☐ Узлы учёта — расход и две температуры — на каждом из трёх контуров.

Автоматика и режимы

- ☐ Порядок насосов: источник первым; сухие контакты насосов заведены в щит машины.
- ☐ Расход нагреваемой воды прекращается через 1 минуту после останова и при пропадании питания.
- ☐ Блокировка по фактическому расходу и температуре в контуре потребителя.
- ☐ Котёл включён параллельно, с приоритетом машины и без подмеса в её обратку.
- ☐ Управление извне — дискретными сигналами; Modbus только на чтение; разбавление 20 минут не прерывается.

☐ Для машины «холод — тепло»: два профиля уставок, порядок переключения от завода в паспорте.

Компоновка, электрика, нормы

☐ Габарит и рабочий вес в задании на строительную часть — с допуском +10 %, полоса под выемку трубок длиной с машину.

☐ Машина изолирована, зал отапливается, температура +5...+45 °С.

☐ Напряжение 380 или 415 В записано явно, насосы контуров посчитаны отдельно от машины.

☐ Водоподготовка обоих водяных контуров, мутность не выше 10 ppm.

☐ Определено, что из контуров попадает под ФНП ОРПД, и проверена действующая редакция ФНП.

Правило прохода: хоть один пункт пуст — проект на экспертизу отдавать рано.

11. Наши объекты

11.1. Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат, Беларусь

Станция тепловых насосов комбината, крупного производителя сульфатной белёной целлюлозы и гофрокартона. Две машины Thermax первого типа на паре утилизируют бросовое тепло и нагревают технологическую воду. Наша работа — поставка оборудования, шеф-монтаж и пусконаладка. Оборудование доставлено на площадку в декабре 2022 года, большая машина пущена в декабре 2023 года, пуск второй запланирован после реконструкции теплоисточника комбината.

Рисунок 23 Абсорбционный тепловой насос Thermax на станции тепловых насосов Светлогорского ЦКК



Таблица 41 Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат, Беларусь

Параметр	SS 40C TP	SS 70B TP
Источник	вода 40 → 25 °С, 84,1 м³/ч	вода 40 → 25 °С, 226,2 м³/ч
Тепло, снятое с источника	1453 кВт	3909 кВт
Греющая среда	пар 6,5 бар изб., 3039 кг/ч	пар 6,5 бар изб., 8098 кг/ч
Подведено паром	2005 кВт	5312 кВт
Нагреваемая вода	45 → 85 °С, 75 м³/ч	45 → 85 °С, 200 м³/ч
Тепловая мощность	3458 кВт	9221 кВт
Тепловой коэффициент	1,72	1,74
Габариты Д × Ш × В	4,66 × 2,31 × 3,48 м	7,77 × 2,91 × 3,85 м
Масса сухая / рабочая	12,1 / 17,0 т	31,3 / 44,4 т
Электропитание	415 В, 50 Гц, 14,9 кВА	415 В, 50 Гц, 28,9 кВА

Обе машины работают на одной температурной паре: подъём 85 – 40 = 45 °С, коэффициент 1,72–1,74, доля бесплатного тепла 42 %. Вместе машины снимают с бросовой воды около 5,4 МВт и от-

дают 12,7 МВт горячей воды.

Что из этого объекта полезно проектировщику:

- **Регулирующий клапан пара** входит в комплект машины, но приезжает в ящике с комплектующими. Место под него на паропроводе, прямые участки и доступ для обслуживания должны быть в проекте.
- **Раствор бромистого лития и подготовленная вода** едут отдельными местами, машина приходит пустой. Масса в работе на 40 % больше сухой — плиту и перекрытие считают по рабочей массе.
- **Паспорт и договорная спецификация** могут расходиться в индексе модели, габаритах и электрике. Габариты, массы и электрику берите по большему значению с его допуском, модель — по договору и акту приёма-передачи.

11.2. Объекты Thermax в мире

По брошюре серии XP у Thermax более 150 абсорбционных тепловых насосов по миру. Выборка из референс-листа Thermax по тепловым насосам: экспорт — 74 машины суммарно на 447 МВт, основная часть — районное теплоснабжение Дании и Швеции.

Таблица 42 Объекты Thermax в мире

Объект	Страна	Модель × кол-во	Тепло, кВт	Греющая среда	Год
Amager	Дания	SS 80D P × 8	84 500	пар	2014–15
Silkeborg	Дания	SS 80D TP × 2 и SD 90B TP × 2	45 856	пар	2016–17
Odense	Дания	SS 80B TP × 2	20 942	пар	2016–17
Renova	Швеция	SS 70B MP × 2	20 318	пар	2017–18
Helsingborg	Швеция	SS 90B P × 1	18 250	пар	2010–11
Egger	Австрия	HS 80B P × 1	13 800	горячая вода	2008–09
Skagen	Дания	ES 40B P × 3	8 800	выхлопные газы	2011–12
Hjortbjerg	Дания	GS 30B TP × 1	1 327	прямое сжигание	2016–17
Солодовенный завод	Индия	SS 60D P × 1	8 000	пар	2009–10
J K Tyre	Индия	SS 20C P × 1	1 925	пар	2014–15
Asia Silicon (тип 2)	Китай	LT 115 PT × 1	4 100	горячая вода	2014–15
Unilever (тип 2)	США	LT 52 PT × 1	885	горячая вода	2018–19

Мощности даны по референс-листу. В презентационных материалах Thermax по некоторым объектам встречаются другие цифры — например, для Amager 60 000 кВт: материалы относятся к разным режимам и очередям. Для проекта опирайтесь только на подбор под ваши условия.

Следующий шаг

Пришлите опросный лист и исходные данные из раздела 3. Мы подберём машину на ваш режим и выдадим лист технических данных, основные технические решения и схемы обвязки, а готовый раздел проверим до экспертизы. Всё это бесплатно.

«Энергия Холода» / НСТ · Санкт-Петербург · abxm-thermax.ru · colden.ru

Telegram-канал Максима Краснова, генерального директора: t.me/krasnov_energy

Словарь терминов

Термин	Что значит
АБТН	Абсорбционный бромистолитиевый тепловой насос: делает полезное тепло из сбросного за счёт греющей среды
Тепловой насос первого типа	Повышает количество тепла: греющее тепло плюс бросовое дают горячую воду; коэффициент около 1,65–1,75
Термотрансформатор, второй тип (heat transformer)	Без внешнего привода поднимает часть бросового тепла выше по температуре, остаток сбрасывает в холодную воду; коэффициент около 0,5
Тепловой коэффициент (COP)	Отношение тепла потребителю к теплу, подведённому в генератор
Доля бесплатного тепла	Часть полезного тепла, взятая у бросового потока: $f = 1 - 1/\varphi$
Бросовое (низкопотенциальное) тепло	Тепло 25–60 °С, которое предприятие сейчас отводит в градирню или в сток; в машине оно идёт в испаритель
Греющая среда	Высокопотенциальное тепло для генератора: пар, горячая вода, газ, выхлопные газы
Температурный подъём (lift)	Разница между температурой горячей воды на выходе и температурой источника
Нагреваемая вода	Продукт АБТН: вода, которая последовательно проходит абсорбер и конденсатор и уходит к потребителю
Разделительный теплообменник	Пластинчатый аппарат между загрязнённым источником и машиной; отнимает несколько градусов подъёма
Кристаллизация	Выпадение соли из крепкого раствора бромида лития при его охлаждении; машина останавливается
Запас до кристаллизации	Разница между температурой крепкого раствора и температурой его кристаллизации
Разбавительный цикл (dilution)	Выравнивание концентрации раствора после останова, защита от кристаллизации при остывании
Невязка теплового баланса	Расхождение между суммой подводов тепла и теплом потребителю, в процентах
Chiller-heater	Одна абсорбционная машина, которая даёт холод, тепло или оба продукта сразу
Каскад	Две машины последовательно: вторая берёт продукт первой как свой источник
Резервный сток тепла	Градирня или сухой охладитель на время, когда потребителя тепла нет
Реле протока	Датчик минимального расхода в контуре машины

Список литературы

1. Thermax. Absorption Heat Pump. The Extra Performance Series-XP — брошюра, версия 1.0, 2024.
2. Thermax. Absorption Heat Pump — листовка 06280.
3. Thermax. Heat Pump Chiller XP — брошюра; Heat Pump Chiller — листовка 06328.
4. Thermax. Руководство по эксплуатации абсорбционного теплового насоса.
5. Thermax. Листы технических данных подборов машин SS, GS серий для объектов в России и Беларуси.
6. Thermax. Heat Pump References — референс-лист тепловых насосов.
7. Опросный лист на абсорбционный тепловой насос Thermax.
8. Herold K. E., Klein S. A., Radermacher R. Absorption Chillers and Heat Pumps.
9. IEA Heat Pump Programme Annex 35 / IETS Annex 13. Application of Industrial Heat Pumps.
10. «Энергия Холода». АБХМ Thermax. Проектирование и обвязка. Руководство для инженеров ЭХ-АРМ001-RU, 2026.



«Энергия Холода» / NCT — российский производитель градирен, чиллеров, насосных групп и автоматики NCT и эксклюзивный партнёр Thermax в России с 2011 года.

Санкт-Петербург · nc-t.ru · colden.ru · abxm-thermax.ru

Подбор машины на ваш режим, основные технические решения, схемы обвязки и проверка раз-
дела до экспертизы — бесплатно для проектировщика заказчика.

Telegram-канал Максима Краснова, генерального директора: t.me/krasnov_energy

ЭХ-АРМ004-RU (октябрь 2026). Материал для проектировщиков, распространяется свободно. Рабочие параметры для проекта — по техническому предложению на конкретную модель.