

сыхания $p_{вс}$ и отношения давлений торможения компрессора от температуры кипения аммиака представлены на рис. 2.

Обобщенные зависимости холодопроизводительности осевого компрессора от температуры кипения аммиака при последовательном снятии первых и последних ступеней приведены на рис. 4.

При последовательном снятии последних ступеней из-за уменьшения отношения давлений в компрессоре увеличиваются давление и плотность на входе в первую ступень, а площадь остается постоянной. По условию подобия параметры $M_{u(1)}$ и $\phi_{1z(1)}$ сохраняют свои значения, но так как температура пара на входе в компрессор растет, а с ней растет и скорость звука, то окружная скорость и частота вращения ротора увеличиваются (штриховая линия на рис. 5). С ними возрастает и расходная составляющая скорости на входе в первую ступень.

В итоге массовый расход, а следовательно, и холодопроизводительность по мере снятия последних ступеней значительно увеличиваются (штриховая линия на рис. 4).

При снятии первых ступеней холодопроизводительность возрастает значительно меньше, чем при снятии последних, что вызвано двумя причинами. Во-первых, и это главное, уменьшается площадь кольцевого сечения при входе в ступени, что приводит к падению расхода. Во-вторых, температура, а значит, и скорость звука в паре, поступающем в промежуточные ступени полноразмерного компрессора, выше аналогичных параметров у компрессоров, с которых сняты первые ступени. Поэтому, чтобы сохранить значение параметров подобия $M_{u(1)}$ и $\phi_{1z(1)}$, необходимо уменьшать

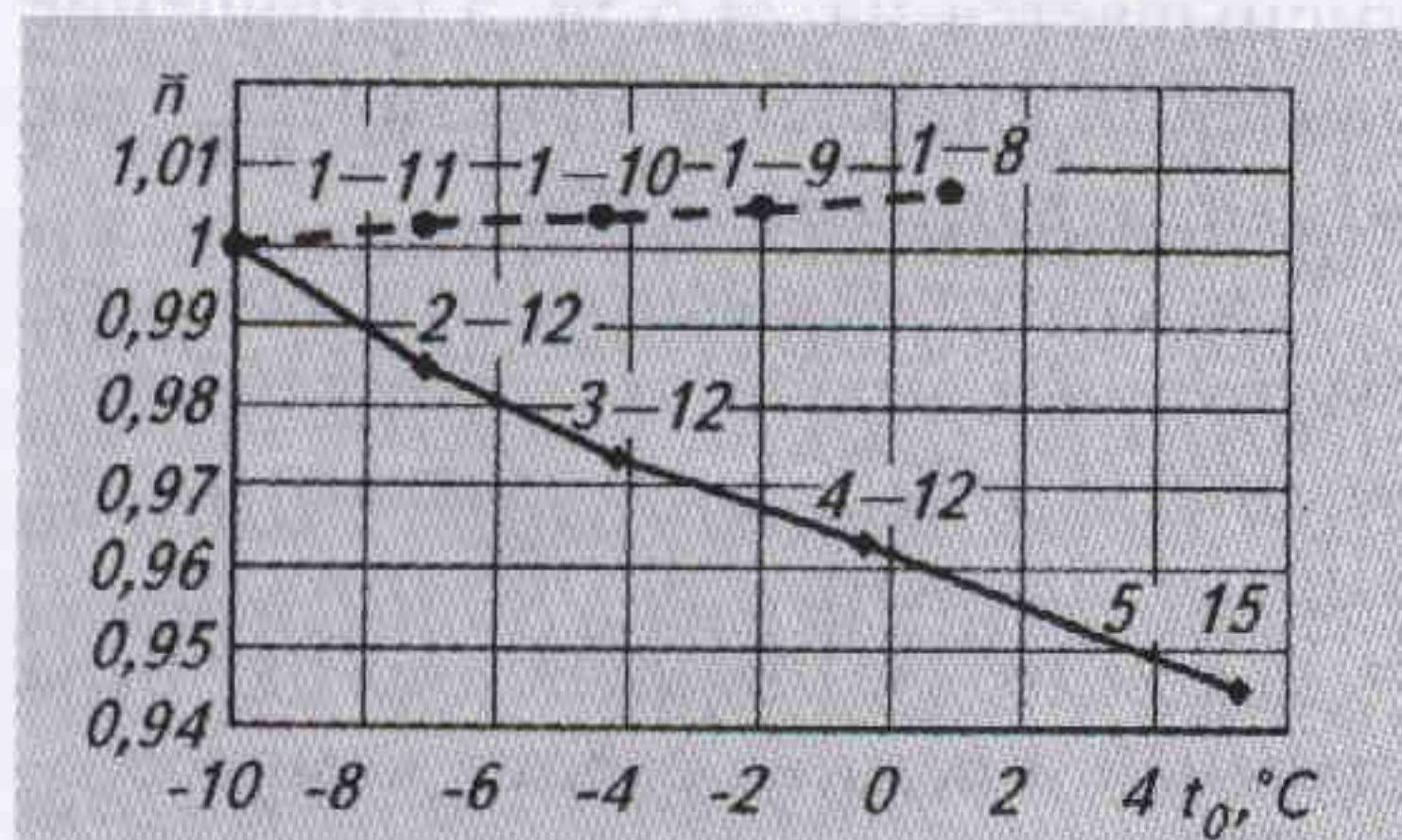


Рис. 5. Изменение приведенной частоты вращения ротора компрессора при снятии первых (—) и последних (---) ступеней. Цифры при точках обозначают число работающих ступеней

окружную скорость и частоту вращения ротора (сплошная линия на рис. 5).

Выполненный на примере 12-ступенчатого осевого компрессора анализ показывает, что даже в режиме работы, соответствующем по существу одной только точке на одной расчетной ветви характеристики компрессора, путем изменения числа ступеней можно получить широкий спектр холодопроизводительностей — от 10 до 16,8 МВт при температурах кипения от -10 до $+5$ °С. Перевод компрессора на те (отличные от расчетной) ветви характеристик, где его КПД сохраняет значения, близкие к максимальным, позволит еще больше расширить диапазон холодопроизводительностей и температур кипения. Заметим, что нами не рассмотрены возможности модификации унифицированного компрессора путем снятия одновременно и первых, и последних ступеней, так как очевидно, что получаемые в этих случаях параметры будут занимать поле между линиями, показанными на рис. 5.

Большое число ступеней, характерное для осевых компрессоров, дает возможность реализовать холодильный цикл с одним компрессором и подводами пара к промежуточным ступеням конструктивно намного проще, чем это делается в центробежных холодильных компрессорах. На этой основе легко могут быть созданы многоизотермные пароконденсационные холодильные машины, вырабатывающие холод на нескольких температурных уровнях в одном агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухарин Н.Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров. — Л.: Машиностроение, 1988.
2. Курылев Е.С., Герасимов Н.А. Примеры, расчеты и лабораторные работы по холодильным установкам. — Л.: Машиностроение, 1971.
3. Создание и отработка на модели осевого компрессора для энергетической газотурбинной установки мощностью 150–200 МВт/А.П.Тарабрин, В.Ф.Нарышкин, Ф.Ш.Гельмедов, Г.А.Комиссаров//Компрессорная техника и пневматика. Вып. 1–2 (14–15). 1997.
4. Теория и расчет турбокомпрессоров/К.П.Селезнев, Ю.Б.Галеркин, С.А.Анисимов и др.; Под ред. К.П. Селезнева. — Л.: Машиностроение, 1986.
5. Холодильные машины: Учебник/А.В.Бараненко, Н.Н. Бухарин, В.И.Пекарев и др.; Под ред. Л.С.Тимофеевского. — СПб: Политехника, 1997.
6. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. — М.: Машиностроение, 1970.

Д-р техн. наук, проф. **А.В.БАРАНЕНКО**
канд. техн. наук **А.В.ПОПОВ**
д-р техн. наук, проф.
Л.С.ТИМОФЕЕВСКИЙ
канд. техн. наук **О.В.ВОЛКОВА**

Абсорбционные преобразователи теплоты (АПТ) представляют собой термодинамическую систему, осуществляющую трансформацию теплоты с высокотемпературного уровня на низкотемпературный (понижающий АПТ) и, наоборот, с низкотемпературного уровня на более высокий (повышающий АПТ) с помощью совмещенных прямого и обратного циклов.

Среди различных типов АПТ наибольшее распространение получили понижающие абсорбционные бромистолитиевые преобразователи теплоты (АБПТ), предназначенные для работы в режимах:

- холодильной машины;
- теплового насоса;
- комбинированной холодильной машины и теплового насоса.

подавляющее большинство выпускаемых зарубежными фирмами (США, Японии и Китая) АБПТ предназначено только для охлаждения воды, используемой в комфортном и технологическом кондиционировании. Объем производства таких машин за рубежом значителен. Например, только Япония в 90-е годы производила ежегодно 2200–2400 крупных машин холодопроизводительностью более 300 кВт.

Широкое распространение АБПТ объясняется их высокой эффективностью, экологической чистотой, бесшумностью, простотой в обслуживании, длительным сроком службы и др. АБПТ менее энергоемки, чем пароконденсационные холодильные машины и тепловые насосы, но для их работы необходим источник теплоты. В качестве такого источника могут быть использованы пар или горячая вода с температурой 80...160 °С или непосредственно продукты сгорания газообразного или жидкого топлива. Можно использовать теплоту, получаемую при утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) [2]. Рабочим веществом в АБПТ служит вода, а абсорбентом — водный раствор соли бромистого лития. Этот раствор пожаровзрывобезопасен и безвреден, а все процессы в АБПТ протекают в вакууме. Элементы АБПТ не испытывают динамических нагрузок и поэтому могут располагаться на любом этаже здания. В настоящее время АБПТ используют преимущественно для выработки холода на температурном уровне 5...10 °С.

В последние годы широкое распространение в мире получили АБПТ с топкой на газовом или жидком топливе. Их доля в общем объеме продукции некоторых фирм достигает 70 %. Это объясняется вы-

Абсорбционные бромистолитиевые преобразователи теплоты нового поколения

Different modifications of Russian absorption lithium-bromide heat transformers (ABPT) of new generation have been developed using science-intensive technologies. They are designed for work under conditions of producing cold, heat and simultaneous production of cold and heat, with heating of generators with hot water, steam, products of combustion of natural gas or liquid fuel. Use in ABPT of new construction materials and profiles of heat exchange tubes, corrosion inhibitors and surfactants allowed to increase the service life of ABPT up to 25 years and reduce the amount of metal consumption to the level comparable with ABPT produced by world leading companies. High technical and cost-efficient indices of ABPT of new generation allow to recommend them as energy-saving refrigerating and heat-pump machines.

кой экономичностью и автономностью таких АБПТ, что существенно расширяет область их применения, сокращает затраты на монтаж и эксплуатацию систем хладо- и теплоснабжения. АБПТ с топкой может выполнять две функции: в летнее время работать как холодильная машина, а в холодное время года — как водогрейный котел.

В настоящее время за рубежом интенсивно ведутся работы по созданию АБПТ, работающих в режиме теплового насоса для отопления и горячего водоснабжения.

В нашей стране производство АБПТ было начато в конце 60-х годов. Серийно выпускались холодильные АБПТ мощностью 1100 и 3000 кВт (АБХА-1000 и АБХА-2500 соответственно). Были также освоены модифицированные агрегаты: АБХА-500 ХТ — для одновременной выработки холода и теплоты и АБХА-2500 ТН — для выработки только теплоты. В случае использования высокопотенциальных греющих источников с температурой 90...180 °С серийный агрегат АБХА-2500 выполняли высокотемпературной приставкой, состоящей из ступени генератора высокого давления и высокотемпературного теплообменника растворов АБХА-2500-2В) [1, 4, 5].

Все перечисленные выше отечественные типы АБПТ можно отнести к машинам первого поколения. Источником теплоты в них служат пар или горячая вода, основным конструкционным материалом для их изготовления — углеродистая сталь. При толщине стенок труб 5...3,0 мм реальный срок службы машин не превышал 5—7 лет.

В зарубежных АБПТ теплообменные поверхности изготавливаются толщиной не более 1,0 мм из медных или медно-никелевых сплавов. Поэтому они имеют существенно меньшие габариты, массу, требуют меньшего количества дорогостоящего литого металла для зарядки аппаратов, срок службы их составляет более 25 лет, а почти в три раза больше, чем у отечественных АБПТ первого поколения.

Низкие потребительские качества машин первого поколения привели к необ-

ходимости создания различных модификаций отечественных АБПТ нового поколения с использованием современных наукоемких технологий.

По инициативе академика РАН В.Е. Наскорякова в Институте теплофизики СО РАН в начале 90-х годов были начаты работы по созданию отечественного АБПТ нового поколения. Работы велись совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом низкотемпературных и пищевых технологий, а также с рядом НИИ и КБ Новосибирска. При разработке АБПТ использовали современные методы математического моделирования тепловых и газогидродинамических процессов. За истекший период был осуществлен большой объем НИОКР, проведены промышленные испытания опытных образцов АБПТ новых типов.

На Новосибирском металлургическом заводе были проведены испытания абсорбционного бромистолитиевого преобразователя

теплоты типа АБТН-2000Г (рис. 1) в режимах теплового насоса с топкой на газовом топливе теплопроизводительностью 2000 кВт [3].

На Барнаульском заводе синтетического волокна проведены пробные испытания генератора теплового насоса АБТН-2000М с топкой на мазуте. На Новосибирской ТЭЦ-4 с января 1999 г. находится в эксплуатации теплонасосный АБПТ мощностью 2000 кВт с паровым обогревом (АБТН-2000П). Испытания таких машин и опыт их эксплуатации позволили разработать и приступить к промышленному производству АБПТ различных модификаций.

В табл. 1 приведены основные показатели некоторых тепловых насосов (тип АБТН), предназначенных для нагрева воды до 50—90 °С. В качестве источника теплоты используются водяной пар

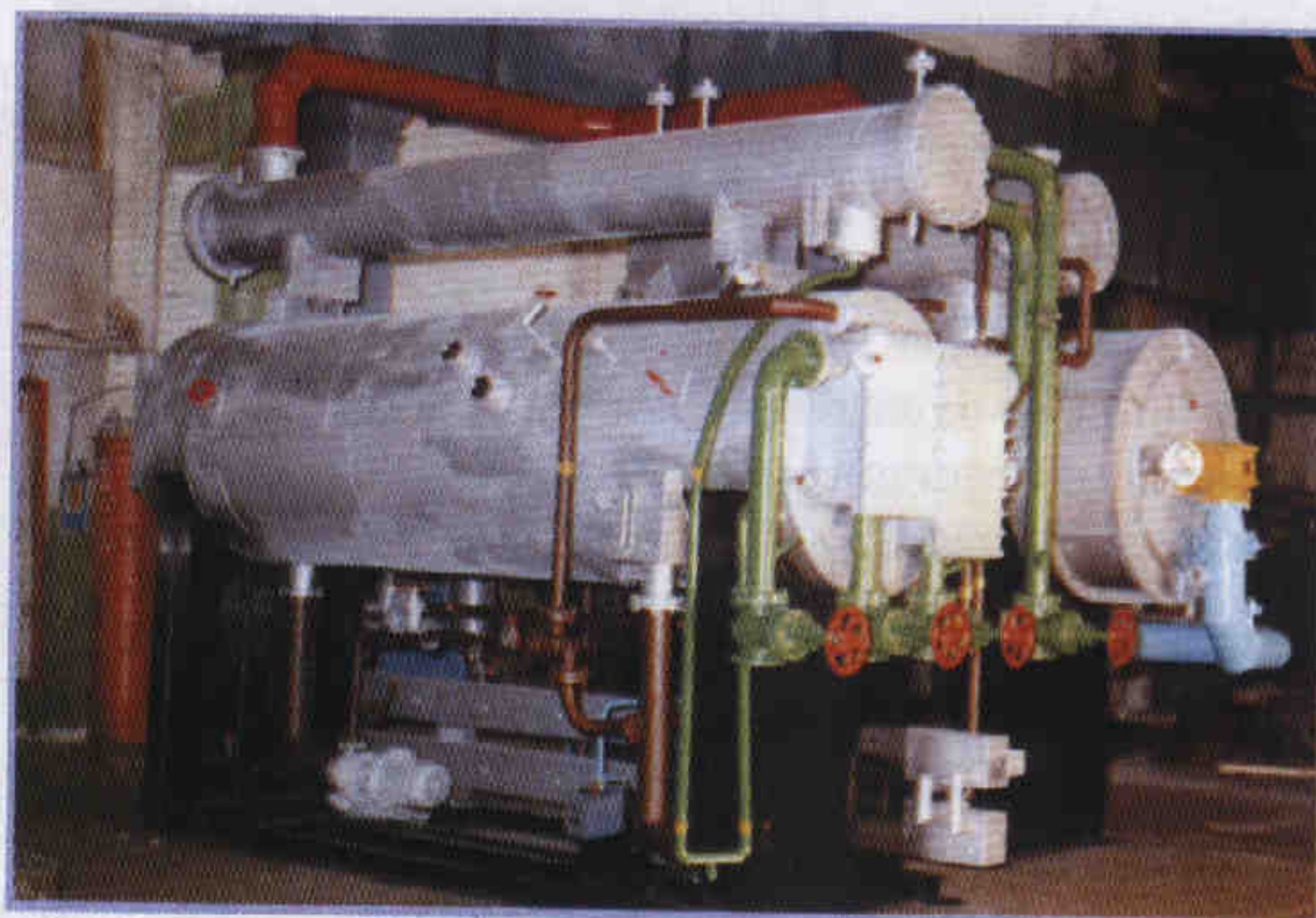


Рис. 1. Общий вид абсорбционного бромистолитиевого теплового насоса с топкой на природном газе

Таблица 1
Основные показатели абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты нового поколения при работе в режимах теплового насоса (тип АБТН)

Параметры	АБТН-2000П	АБТН-5000П	АБТН-2000Г	АБТН-5000П
Теплопроизводительность, кВт	2200	5500	2000	5000
Количество используемой низкопотенциальной теплоты, кВт	800	2000	800	2000
Температуры нагреваемой воды, °С: вход выход	30...60 50...90			
Температуры охлаждаемой воды, °С: вход выход	25...65 10...45			
Расходы теплоносителей: греющего пара давлением 0,3—0,7 МПа, кг/ч газового топлива, м³/ч нагреваемой воды, м³/ч охлаждаемой воды, м³/ч	2000 — 35...85 30...70	5000 — 90...210 75...175	— 140 35...85 30...70	— 350 90...210 75...175
Потребляемая электроэнергия, кВт	4	8	6	12
Коэффициент трансформации теплоты (отношение количества теплопроизводительности к затраченной теплоте греющего источника)	1,65...1,75			
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), м	4,6×2,0×3,5	7,2×2,6×4,0	4,6×3,0×2,5	7,2×5,5×3,0
Масса (сухая), т	10,5	24	11	25

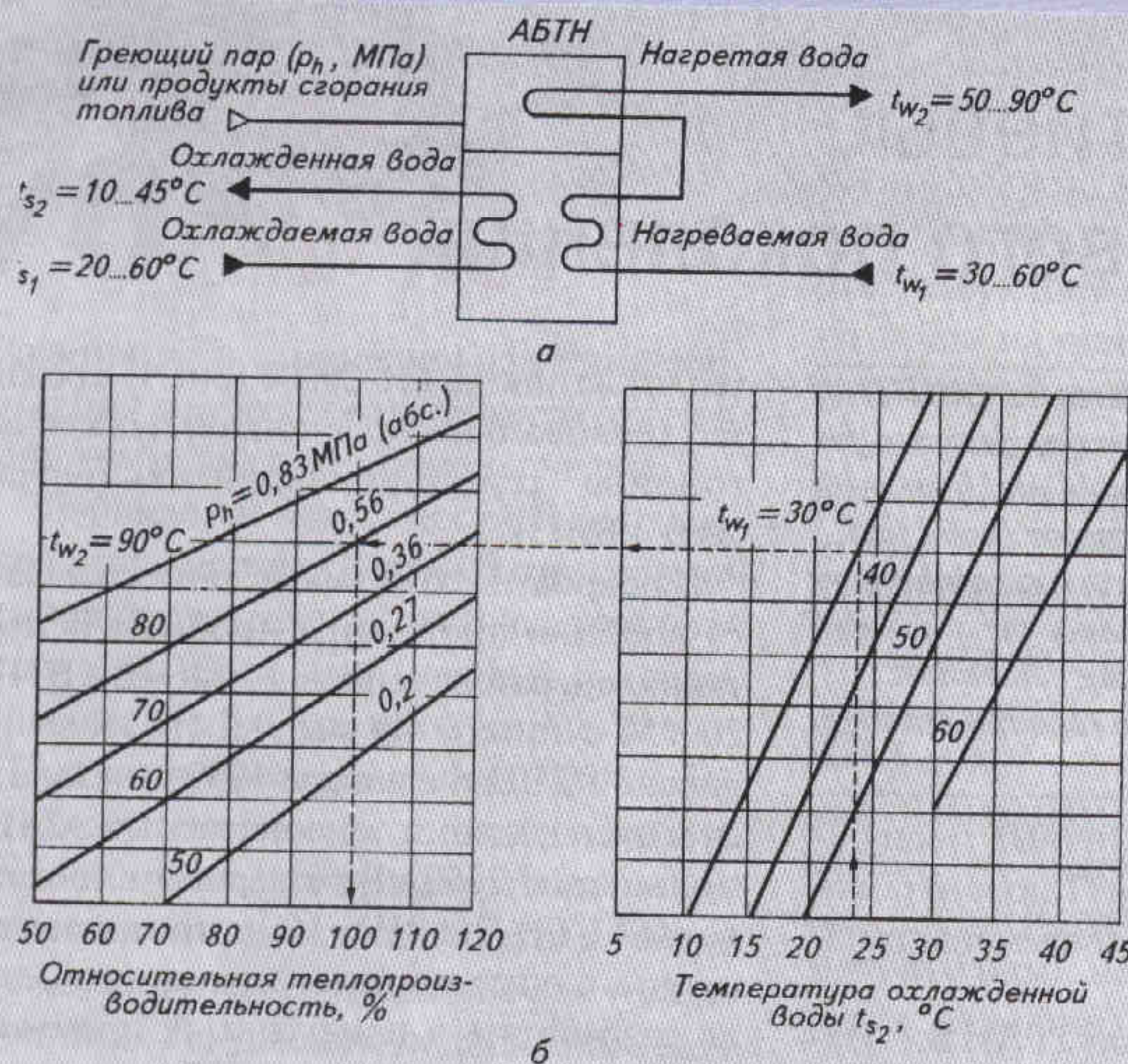


Рис. 2. Схема подключения к АБТН внешних источников теплоты (а) и зависимости относительной теплопроизводительности АБТН от параметров внешних источников теплоты (б)

(АБТН-2000П, АБТН-5000П), газовое или жидкое топливо (АБТН-2000Г, АБТН-5000Г). На рис. 2 приведены зависимости характеристик АБТН от изменения параметров внешних источников теплоты.

В табл. 2 даны основные показатели некоторых АБПТ в режимах холодильной машины с паровым обогревом и одноступенчатой схемой регенерации раствора (АБХМ1-1500П, АБХМ1-600П); с паровым обогревом и двухступенчатой схемой регенерации раствора (АБХМ2-1500П); с топкой на газовом топливе и двухступенчатой схемой регенерации раствора (АБХМ-1000Г).

Применение в теплообменных аппаратах тонкостенных медноникелевых труб специального профиля позволило значительно повысить надежность и снизить удельную металлоемкость отечественных АБПТ нового поколения, сделать их более компактными и продлить срок службы. Введение в раствор поверхностно-активных веществ способствует интенсификации теплообмена. Использование новых ингибиторов коррозии, обеспечивающих практически 100%-ную защиту от нее всех элементов машин в различных рабочих фазах (жидкой, паровой, на границе раздела фаз), дает возможность увеличить срок службы АБПТ до 25 лет. Машины поставляются в полной заводской готовности, для их зарядки требуется небольшое количество бромистого лития.

Для циркуляции водного раствора бромистого лития и воды применяются высоконадежные и ремонтпригодные отечественные специальные герметичные бессальниковые насосы с магнитной муфтой и малым кавитационным запасом.

При создании АБПТ особое внимание было уделено их герметичности (вакуум-

ной плотности), которая на 2 порядка выше, чем у отечественных АБПТ первого поколения. Машины оснащены современными приборами автоматизации и защиты.

Таким образом, отечественные АБПТ нового поколения по своим параметрам соответствуют зарубежным образцам подобной техники. В то же время их цена существенно ниже.

Опыт эксплуатации и анализ эффективности АБПТ нового поколения показывают следующее.

- При работе в режимах теплового насоса себестоимость получаемой в АБТН теплоты на 20–30 % ниже себестоимости теплоты, получаемой в котельных, при этом экономия топлива составляет 40–50 %. Учитывая существующие тарифы на теплоту от централизованных энергосистем, себестоимость теплоты, получаемой в АБТН, в 2–3 раза ниже.

- Использование АБТН для одновременного получения теплоты и охлаждения технологических объектов приводит к дополнительному повышению экономической эффективности систем с АБТН. При обогреве АБТН путем сжигания в них природного газа достигаются наибольшая экономическая эффективность и наименьший срок окупаемости капитальных вложений (не более 1 года).

- Себестоимость холода, получаемого в АБХМ, использующих низкопотенциальные тепловые выбросы (пара или воды с температурой 85...110 °C), в 2–3 раза ниже себестоимости холода, получаемого в парокомпрессионных холодильных машинах.

- Себестоимость холода, получаемого в АБХМ, использующих пар давлением 0,4–0,8 МПа, при существующих (усредненных для европейской части России)

Основные показатели абсорбционных бромистолитиевых преобразователей теплоты нового поколения при работе в режиме холодильной машины (тип АБХМ)

Параметры	АБХМ1-1500П	АБХМ2-1500П	АБХМ-1000Г	АБХМ-600П
Холодопроизводительность, кВт	1500	1500	1000	600
Температуры охлаждаемой воды (вход/выход), °C	12/7			
Температуры охлаждающей воды (вход/выход), °C	28/36			
Расход теплоносителей:				
греющего пара давлением 0,6 МПа, кг/ч	—	2000	—	—
греющего пара давлением 0,15 МПа, кг/ч	3800	—	—	1400
газового топлива, м³/ч	—	—	110	—
охлаждаемой воды, м³/ч	260	260	175	100
охлаждающей воды, м³/ч	390	300	200	150
Потребляемая электроэнергия, кВт	12	12	7	4,5
Тепловой коэффициент (отношение холодопроизводительности к затраченной теплоте греющего источника)	0,65–0,75	1,1–1,2		0,65–0,75
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), м	7,5×2,0×3,5	7,5×3,0×3,5	5,3×3,2×2,8	5,1×1,5×2,0
Масса (сухая), т	20,5	23	16,0	8

ценах на теплоту и электроэнергию сопоставима с себестоимостью холода, получаемого в парокомпрессионных холодильных машинах.

- Себестоимость холода, получаемого в АБХМ с топкой на природном газе, при существующих ценах на природный газ и электроэнергию в России на 30–40 % ниже себестоимости холода, получаемого в парокомпрессионных холодильных машинах. При фиксированной стоимости электроэнергии, даже в случае 2–3-кратного увеличения стоимости природного газа, АБХМ с топкой на природном газе будут более эффективны по сравнению с парокомпрессионными холодильными машинами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орехов И.И., Тимофеевский Л.С., Караван С.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. — Л.: Химия, 1989.
2. Попов А.В. Система охлаждения и утилизации теплоты дымовых газов мусоросжигающих заводов // Очистка и обезвреживание дымовых газов из установок, сжигающих отходы и мусор: Сб. науч. тр. Новосибирск. 1999.
3. Попов А.А., Богданов А.И., Паздников А.Г. Опыт разработки и создания абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов // Промышленная энергетика. 1999. № 8.
4. Промышленный абсорбционный бромистолитиевый холодильный агрегат с одноступенчатой регенерацией раствора // Холодильная техника. 1983. № 4.
5. Шмуйлов Н.Г. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные и тепловые насосы. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1983.