

**Дональд С. Эриксон,**  
Energy Concepts Co. (США)

# Тепловой насос-чиллер с тепловым приводом и новый стандарт эффективности

*Обычные водонагреватели, работающие на тепле, имеют эффективность 80-95%. Эффективность нового теплового насоса с тепловым приводом (ТНТП), который представлен в настоящей статье, превышает 140%. В дополнение к этому на холодном конце ТНТП производится полезный холод. Количество получаемого без энергозатрат холода при этом равняется количеству перекачиваемого тепла. Такое сочетание рекордно высокой эффективности производства горячей воды и холода от того же источника является весьма привлекательным.*

*В статье дается объяснение того, как работает ТНТП, использующий аммиачно-водяной абсорбционный цикл. Представлены также результаты полномасштабных испытаний ТНТП, установленного на птицеперерабатывающем комбинате, где за счет подводимого паром тепла 530 кВт производится*

*320 кВт для охлаждения воды и 850 кВт – для получения горячей. Установка эксплуатируется в автоматическом режиме циклами по 20 часов 5 дней в неделю. Срок окупаемости примерно 1,8 года.*

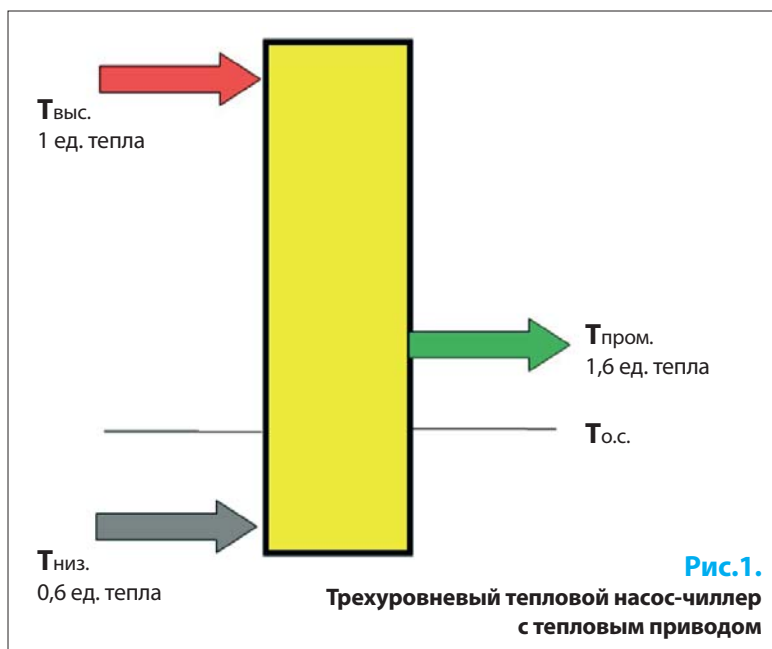
## **Введение**

Значительная часть процессов нагрева производится при низкой температуре, т.е. при температуре ненамного выше температуры окружающей среды. Примерами могут служить производство горячей воды (50-70<sup>0</sup>С), отопление (20-25<sup>0</sup>С), сушка (40-90<sup>0</sup>С). На эти нужды потребляется невероятное количество энергии – только в США 50·10<sup>8</sup> гигакалорий в год.

Еще больше удивляет то, насколько неэффективны обычные процессы нагрева при низкой температуре. Как сообщают производители котлов и бойлеров, их эффективность составляет от 80-95% при сжигании органического топлива до 98%

и более при нагреве электричеством или паром. Однако в этом случае речь идет об эффективности по 1-му закону термодинамики; подлинная же термодинамическая эффективность определяется по 2-му закону. Если для нагрева воды до 55<sup>0</sup>С используется топливо с адиабатической температурой пламени 1 600<sup>0</sup>С, то эффективность по 2-му закону термодинамики оказывается весьма низкой – всего около 23%. Если использовать электронагреватели сопротивления, то ее значение вообще падает до 10%. Иначе говоря, идеальный обратимый цикл, использующий то же количество электроэнергии, что нагреватель сопротивления, способен нагреть в десять раз больше горячей воды.

Одним из последствий чрезвычайно низкой эффективности обычных низкотемпературных (НТ) водонагревателей является потенциальная целесообраз-



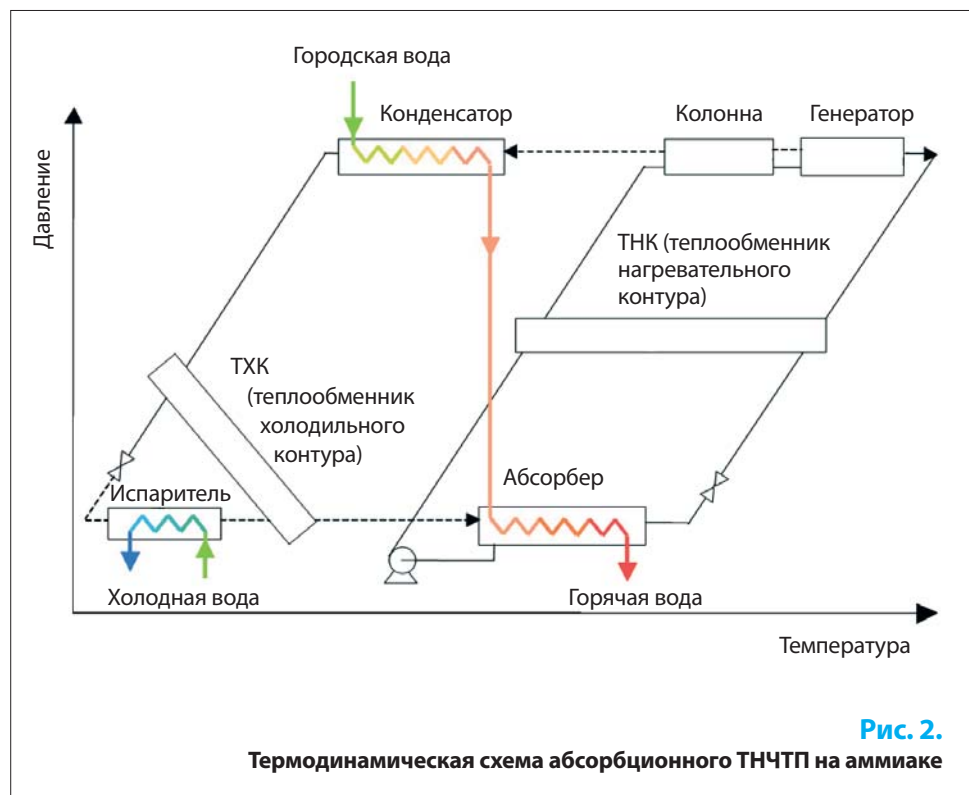
верности заявленных значений эффективности. Первая установка, находящаяся в эксплуатации в течение четырех лет, имела небольшую холодопроизводительность 20 кВт и работала короткими циклами, по 30 часов в неделю с многочисленными пусками и остановками. Вторая установка имела холодопроизводительность 350 кВт и работала по 100 часов в неделю.

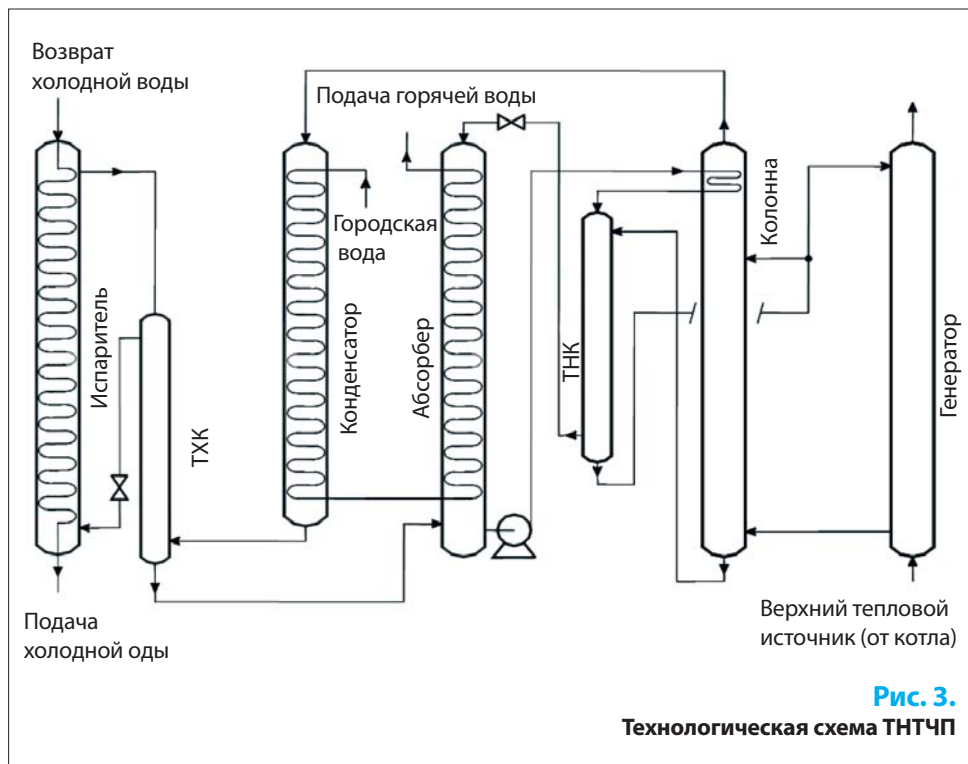
Первая доказала свою способность к длительной эксплуатации, но, тем не менее, не наработала достаточного срока, чтобы достигнуть хороших экономических показателей. Вторая уже на демонстрационном этапе окупилась за два года, без дополнительных капиталовложений.

ность использования альтернативных технологий – например, комбинированных теплоэнергетических процессов (ТЭП) или солнечных нагревателей. В итоге оказывается, что низкий КПД и большие удельные затраты на топливо оправдывают переход на новые (и дорогие) технологии нагрева воды, поскольку они потребляют меньше топлива.

К сожалению, капитальные затраты на внедрение более эффективных процессов нагрева воды, ТЭП и солнечного нагрева оказываются настолько высокими, что срок окупаемости затягивается на практике до четырех лет и более, и прогресс в этой области довольно медленный. Поэтому сохраняется востребованность более простых способов повышения эффективности и экологических показателей установок низкотемпературного нагрева.

Именно к этой категории относится тепловой насос-чиллер с тепловым приводом (ТНЧТП). К настоящему времени были проведены два цикла его натурных испытаний с целью проверки досто-





### Характеристики ТНЧТП

При работе теплового насоса этого типа тепло подводится к его холодному концу, производя тем самым холодную воду, и отводится от теплового конца, производя теплую воду. Выражение «с тепловым приводом» означает, что движущей силой процесса является тепло, подводимое при более высокой температуре, а также то, что тепло отдается в виде горячей воды (рис. 1). Что касается числовых соотношений, то на единицу высокотемпературного тепла, подводимого к ТНЧТП в качестве источника энергии, получается 0,6 единиц холодопроизводительности. С горячей водой из насоса отводится суммарно 1,6 единиц теплоты. Таким образом, полная производительность установки складывается из

0,6 единиц холода и 1,6 единиц тепла, идущего на нагрев воды.

На рис. 2 показано, каким образом это осуществляется в реальном термодинамическом цикле, конкретно – в абсорбционном. Вообще, можно представить себе много вариантов обеспечения подобного результата с точки зрения термодинамики, но, как нам представляется, предлагаемый цикл является наиболее практичным. Высокотемпературное тепло подводится в цикл в генераторе, холодопроизводительность реализуется в испарителе, а отвод тепла с получением горячей воды происходит в конденсаторе и абсорбере.

Эффективность (холодильный коэффициент) абсорбционного цикла (в том числе и рассматриваемый), в кото-

ром на единицу подводимого тепла производится 0,6 единиц холода, составляет 0,6.

На рис. 3 представлена принципиальная схема, реализующая термодинамический цикл (см. рис. 2), с указанием основных компонентов и соединительных трубопроводов.

### Демонстрационные натурные испытания

В соответствии с практикой, рекомендуемой Министерством сельского хозяйства США, подготовка битой птицы для реализации должна содержать два этапа: ошпаривание при 57<sup>0</sup>С с непосредственно следующим за этим охлаждением в воде с температурой 0,5<sup>0</sup>С. Установка, на которой осуществлялась демонстрация, перерабатывает 50 000 птиц в час при ежедневной работе в течение 16 часов. Для этого требуется непрерывная циркуляция, по меньшей мере, 785 л/мин горячей воды и такого же количества холодной. Обычно горячую воду получают из пара под давлением 630 кПа, производимого в котлах, нагреваемых за счет сжигания природного газа, а холодная вода производится аммиачной компрессорной холодильной установкой с электроприводом компрессоров. При нынешних ценах на энергоносители – 90 центов за количество газа, имеющее скрытую теплоту сгорания 35 кВт·ч (1 терм) и 9 центов за 1 кВт·ч электроэнергии – го-

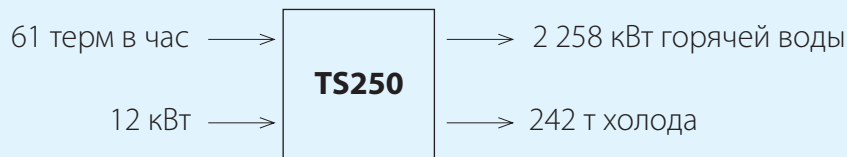
довые эксплуатационные расходы комплекса составляют 454 000 долл. за природный газ для производства горячей воды и свыше 100 000 долл. – за электроэнергию для производства холодной.

ТНЧТП производит как холодную, так и горячую воду от одного источника тепла. Для этого используется тот же самый пар, который в прежнем варианте производил горячую воду, но с двумя важными отличиями. Во-первых, вместо 98%-ной эффективности парового водонагревателя в ТНЧТП пар превращается в горячую воду с эффективностью 156% за счет теплонасосного эффекта. Во-вторых, холодная вода производится в качестве побочного продукта производства горячей, что устраняет потребность в отдельном чиллере или дополнительном расходе энергии на охлаждение.

Ниже ( I ) представлен расчет потребности в горячей воде для переработки 50 000 кур в час, причем ТНЧТП в полтора раза снижает потребность в тепле и в 20 раз – в электричестве. В ( II ) приведена соответствующая калькуляция экономических затрат, из которой следует, что расходы на энергосбережение падают на 276 тыс. долл. в год, т.е. снижаются более, чем вдвое по сравнению с существующими. Если исходить из капитальных затрат на установку ТНЧТП с холодопроизводительнос-

### Пример режима работы TS250 при переработке птицы

- Непрерывное ошпаривание и охлаждение:  
50 000 тушек в час, 0,94 л/тушка = 785 л/мин
- Требование по нагреву горячей воды:  
785 л/мин с 16 до 57 °С = 2 258 кВт
- Требование по охлаждению:  
785 л/мин с 16 до 0,5 °С = 242 т холода (эквивалентно 242 кВт)
- Технические данные термосорбера:



I

### Экономия применения TS250 при переработке птицы

- Часовая экономия:
 

36 терм по цене 0,90 долл./терм	– 32,40 долл. в час
230 кВт·ч по цене 0,09 долл./кВт	– <u>20,70 долл. в час</u>
	– 53,10 долл. в час
- Годовая экономия (при работе в режиме 20/5):  
5 200 часов по цене 53,10 долл. – 276,120 долл. в год
- Капитальные затраты – 500 000 долл.
- Срок окупаемости – 1,8 года
- Сокращение выброса CO<sub>2</sub> – 1 800 т в год

II

тью 875 кВт в объеме 500 тыс. долл., срок окупаемости составит 1,8 года. При этом происходит и существенное снижение выброса CO<sub>2</sub> в атмосферу – на 1 800 т в год.

#### Результаты демонстрационных испытаний

В подтверждение таких благоприятных экономических перспектив демонстрационные испытания были организованы без какого бы то

ни было ущерба для базового предприятия. Установка (фото 1) была спроектирована таким образом, чтобы производить одновременно 550 кВт холода и 930 кВт тепла в виде горячей воды за счет 580 кВт, отводимых от пара под давлением 630 кПа. Она вошла в состав птицеперерабатывающего комплекса для охлаждения воды, непрерывно поступающей в чиллер, и подогрева воды для непрерывного ошпари-





- Производит до 350 кВт холода и 930 кВт тепла (горячая вода) за счет подвода 580 кВт от пара
- Экономит 30% энергии при нагреве воды и 90% при охлаждении
- Холодная (5<sup>0</sup>С) и горячая (58<sup>0</sup>С) вода
- Автоматическая работа пять дней в неделю по 20 часов в сутки

**Фото 1.**

**ТНЧТП для комплекса переработки птицы**

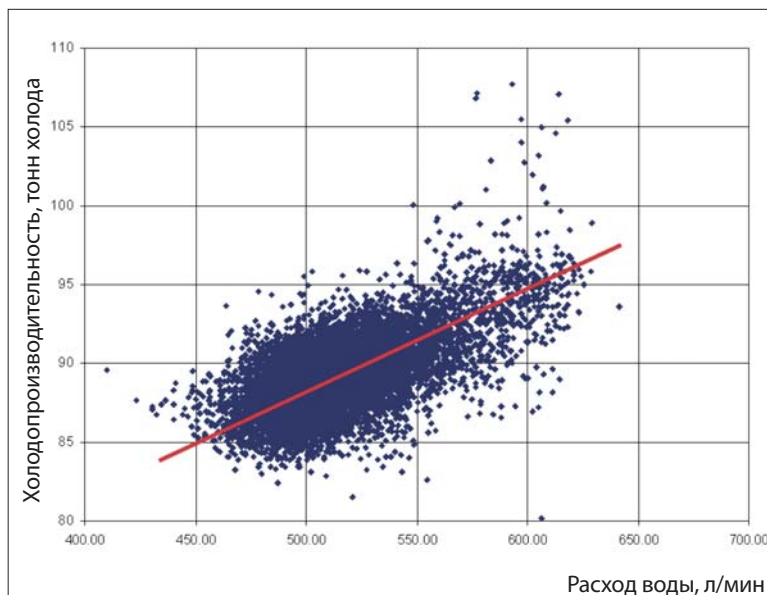
вания тушек. Были выполнены трубные соединения для подключения к паровому котлу, системе возврата конденсата, городскому водопроводу и системе горячей воды. Система была автоматизирована путем установки датчиков уровня в существующих баках для хранения горячей воды. Сигнал о заполнении любого из этих баков вызывает отключение установки, для повторного запуска которой необходимо, чтобы уровень в обоих баках был ниже заданного значения. Было также принято решение врезать в линию подачи воды из городской сети насос-бустер, так как давление в сети постоянно колеблется. Основным средством поддержания температуры горячей и холодной воды является регулирование расхода той и другой.

Установка эксплуатировалась по 16 часов в сутки

по рабочим дням во время переработки птицы и в течение первых четырех часов во время промывки системы, когда требуется много горячей воды и производится заполнение бака холодной водой. Первые несколько ме-

сяцев ежедневный запуск и остановка осуществлялись вручную, после чего были задействованы датчики уровня в баках, и четыре месяца система эксплуатировалась в автоматическом режиме.

Как обычно случается, в ходе демонстрационных испытаний несколько раз потребовалось вмешательство оператора из-за неполадок, связанных с подтеканием соленоидного клапана. В системе были установлены два отсечных соленоидных клапана, которые перекрываются при остановке установки, чтобы сохранить запас технологических жидкостей и тем самым обеспечить последующий пуск. Небольшая внутренняя течь в одном из них привела к постепенному падению уровня в ресивере насоса. При ежедневной работе это не представ-



**Рис. 4.**  
**Влияние расхода горячей воды на производительность ТНЧТП**  
**(1 тонна холода в США = 3,513 кВт)**



**Фото 2.**

**Термосорбер TS50, 175 кВт**

ляло особенной проблемы, поскольку перерыв в работе длился всего около четырех часов. Однако при 40-часовом

отключении по выходным дням уровень в ресивере падал до того, что в линии всасывания насоса вода кончалась, и установку нельзя было запустить обычным образом. Поэтому приходилось вручную присоединять байпасный шланг и доливать раствор в ресивер. И, в конце концов, этот клапан просто заменили. На будущее же, учитывая, что соленоидная арматура иногда подтекает, следует, для повышения надежности установки, установить ресивер большей емкости и сделать стационарную врезку байпаса.

В таблице собраны данные по нескольким режимам, при которых производилась регистрация эксплуатационных параметров с последующей их обработкой. Поскольку

данная демонстрационная установка покрывала всего около 40% потребностей комплекса, приходилось поддерживать высокие значения расхода горячей и холодной воды, что позволяло поддерживать производительность теплового насоса чуть выше 315 кВт (рис. 4).

Если при достижении больших значений перепада температуры холодной и горячей воды (соответственно 5 и 55<sup>0</sup>С) их расход уменьшался, то производительность снижалась примерно до 230 кВт.

#### **Другие области применения**

Такая система может найти применение везде, где требуется нагрев воды до 45-70<sup>0</sup>С плюс некоторое количество холода.

### **Результаты демонстрационных испытаний ТНЧТП в различные дни**

Параметры	7.4.06	8.4.06 а	8.4.06 b	8.4.06 с	8.4.06 d	31.5.06	1.6.06	6.6.06	13.6.06	14.6.06	1.8.06	2.8.06
Температура, <sup>0</sup> С:												
пар	154,1	154,7	158,9	157,5	158,4	156,1	157,2	158,3	158,9	157,2	159,3	158,3
конденсат	150,8	154,0	156,8	156,0	157,0	155,0	154,4	155,0	158,3	147,8	158,2	157,2
вода из сети	21,1	20,6	21,0	20,9	20,5	20,6	20,6	21,1	20,6	20,6	21,1	21,2
холодная вода	10,8	10,1	10,1	10,9	10,6	11,1	11,1	11,1	10,6	11,1	11,0	11,5
горячая вода	48,1	48,3	49,7	49,7	50,2	48,9	48,9	48,3	49,4	47,8	46,2	46,6
Расход воды, л/мин:												
насос для раствора	65,3	62,1	63,2	59,8	58,7	61,3	62,8	61,7	62,1	63,6	66,6	66,6
холодная вода	444,7	444,7	444,7	444,7	444,7	450,4	450,4	458,0	446,6	465,6	469,3	469,3
горячая вода	462,9	468,2	454,2	433,8	412,6	416,4	425,4	474,3	437,9	456,8	520,4	498,9
конденсат	17,0	17,8	18,5	17,4	17,0	16,7	17,0	18,2	17,8	17,0	18,2	17,8
Давление, бар:												
ВД	15,5	15,6	15,7	15,6	15,9	14,8	14,8	14,9	14,8	14,8	15,9	15,8
НД	4,7	4,4	4,5	4,5	4,7	4,9	4,9	4,9	4,7	4,9	4,7	4,8
Производительность, т холода	90,6	92,6	96,0	87,7	87,2	84,1	84,1	90,5	88,3	86,9	93,8	89,7
Коэффициент COP	0,586	0,570	0,576	0,557	0,567	0,551	0,548	0,553	0,548	0,550	0,574	0,560
Тепловые нагрузки, кВт:												
конденсатор	358,6	382,0	394,5	372,6	365,3	360,3	358,4	389,7	382,6	370,5	379,4	365,0
теплообменник ТХК	30,7	35,0	35,6	33,8	35,9	29,7	29,6	31,6	30,7	26,1	28,5	30,8
испаритель	318,7	325,5	337,6	308,5	306,8	295,7	295,7	318,3	310,5	305,6	329,8	315,3
ВТ абсорбер	324,8	327,4	329,1	305,0	294,3	321,5	341,8	379,2	363,5	357,7	340,9	366,6
НТ абсорбер	181,2	189,1	201,4	186,4	189,8	153,5	136,5	127,1	132,3	134,7	186,6	149,5
теплообменник ТНК	105,8	114,5	115,7	107,9	104,0	118,3	121,6	120,9	125,5	123,4	130,7	128,8
генератор	544,2	571,5	585,9	554,1	541,2	536,8	539,2	575,9	566,1	555,5	575,0	563,5

Примером могут служить:

- снабжение горячей водой и отопление в жилищно-коммунальном секторе;
- промышленная сушка;
- производство продуктов питания.

Семейству установок ТНЧТП разработчики присвоили бренд ThermoSorber. Стандартные термосорберы производятся в диапазоне производительности от 240 кВт по теплу (90 кВт по холоду) до 1 800 кВт по теплу (700 кВт по холоду). Источником тепловой энергии может служить пар, природный газ, пропан, мазут, солнечный нагреватель либо тепло выхлопных газов или отбросное теп-

ло бойлера. Изображенная на **фото 2** модель TSSO (175 кВт холода) позволяет сэкономить на системе энергоснабжения среднего размера больницы или гостиницы более 100 тыс. долл. в год при капитальных затратах около 150 тыс. долл. Термосорбер такого масштаба позволяет снизить выброс углекислоты в атмосферу на 395 тонн в год. По специальному заказу может быть изготовлен термосорбер на любую производительность, в перспективе – для индивидуального жилья.

Национальная лаборатория энергетических технологий Министерства энергетики США финансировала

начальные этапы разработки термосорбера. Спонсорами двух демонстрационных испытаний были California Energy Commission и Pacific Gas&Electric Company.

### Заключение

Испытания подтвердили рекордную эффективность теплового насоса-чиллера с тепловым приводом. Они показали также, что при использовании нагрева паром или органическим топливом система имеет прекрасные экономические показатели: полезное использование тепла около 62%.

По материалам бюллетеня «IEA Heat Pump Centre newsletter» (Швеция), №1, 2007

## РАЗБОРНЫЕ, ПАЯНЫЕ, МОДУЛЬНО-СВАРНЫЕ И СВАРНЫЕ ПЛАСТИНЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

ДЛЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ, ПИЩЕВОЙ И МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Инженерные расчеты и помощь в подборе оборудования



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

**"ПРОМЭНЕРГО СБЫТ"**

Вся информация на сайтах  
<http://WWW.TEPLOOBMEN.RU>  
<http://WWW.PROMBOILER.RU>

Тел./факс: (495) 708-4292 /многоканальный/  
E-mail: [tex@teplobmen.ru](mailto:tex@teplobmen.ru)

Офис: 129343, Москва,  
проезд Серебрякова, д. 6, (2-ой этаж)

