

УДК 66. 047

**СУШКА С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ
В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ:
ВОЗМОЖНОСТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

В.И. Коновалов, Е.В. Романова, Н.Ц. Гатапова

*Кафедра «Технологические процессы и аппараты», ГОУ ВПО «ТГТУ»;
kvipri@ce.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: тепловой насос; теплотрансформация; энергосбережение; высокотемпературная сушка; сушилки высокой производительности.

Аннотация: Рассматриваются возможности энергосбережения с использованием тепловых насосов разных типов в сушильных установках химической промышленности при высоких температурах и производительностях. Показана необходимость экспериментальной проверки для всех конкретных случаев. Для анализа и выбора лабораторных решений приводятся сводная выборочная таблица и опубликованные характеристики экспериментальных, реализованных или разработанных установок.

1. Предложение использовать холодильный цикл для повышения температуры высказал в 1852 г. Уильям Томсон, лорд Кельвин (William Thomson, 1824–1907) [1–3]. Это и есть цикл теплового насоса (ТН). Предложение было высказано через 28 лет после знаменитой работы Сади Карно (Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796–1832), вышедшей в 1824 г., но не замеченной современниками и не переиздававшейся при жизни автора. Работа Карно стала известной только после его смерти (от холеры) благодаря публикациям Клапейрона (Benoît Paul Émile Clapeyron, 1799–1864) и их переводам на английский и немецкий языки. Клапейрон при этом ввел в теорию теплоты матанализ и графическое изображение процессов на диаграммах, в том числе цикла Карно. Собственно работа Карно непосредственно была посвящена исследованию тепловой (паровой) машины для совершения работы – в круговом процессе («прямой» цикл Карно). Однако в этот же «блистательный 25-летний период (1834–1859)» [4] возникли три основных холодильных устройства: парокомпрессионная холодильная машина (на диэтиловом эфире) – Я. Перкинс (Jacob Perkins, 1834), воздушная – Дж Горри (John Gorrie, 1844) и аммиачная абсорбционная – Ф. Каррэ (Ferdinand Carré, 1859). Далее, особенно в XX веке, холодильная техника очень быстро развивалась, расширялась и стала массовой (холодильник есть практически в каждом доме). Теории и практике холода посвящены многие работы, в том числе капитальные и продолжающиеся издания (напр., [4–13]).

2. В обратных холодильных и теплонасосных циклах Карно (рис. 1), начавшихся с вышеупомянутой работы Кельвина, целью является не получение работы, а передача теплоты. Но теплота в них должна передаваться «в противоположном направлении»:

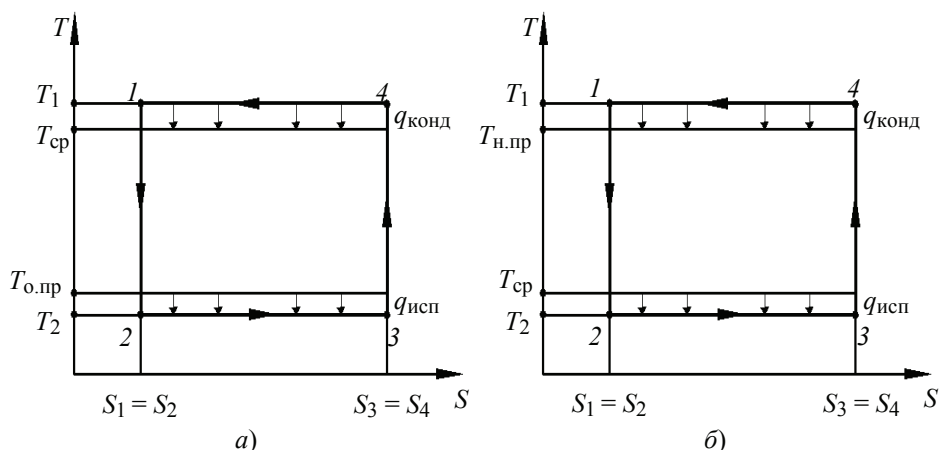


Рис. 1. Обратный цикл Карно*:

a – холодильный; *б* – теплонасосный;

1–2 – детандер (расширение); *2–3* – испаритель;

3–4 – компрессор (сжатие); *4–1* – конденсатор

– в холодильном цикле (см. рис. 1, *a*) цель процесса – охлаждение «холодного горячим»; здесь $T_{о.пр}$ – температура охлаждаемого продукта (целевая); $T_{ср}$ – температура теплопринимающей среды;

– в теплонасосном цикле (см. рис. 1, *б*) цель процесса – нагрев «горячего холодным»; здесь $T_{н.пр}$ – температура нагреваемого продукта; $T_{ср}$ – температура теплоотдающей среды.

Для такой передачи тепла нужно затрачивать работу, величина которой в цикле Карно термодинамически минимальна из всех возможных процессов. То есть, коэффициенты преобразования тепла (отношение полученного тепла q к затраченной работе L) или холодильный $\epsilon_{хол}$ и отопительный $\epsilon_{отоп}$ коэффициенты $\epsilon = q/L$ в циклах Карно максимальны (часто используют также обозначение **COP** – Coefficient of Performance; мы будем придерживаться учебника Кириллина–Сычева–Шейндлина [1]). Их величины определяются температурами рабочего вещества в цикле:

– для холодильных машин – холодильный коэффициент** $\epsilon_{хол} = T_2/(T_1 - T_2)$;

– для теплонасосных – отопительный коэффициент** $\epsilon_{отоп} = \epsilon_{хол} + 1 = T_1/(T_1 - T_2)$.

Поскольку обычно $T_2, T_1 \gg (T_1 - T_2)$, $\epsilon \gg 1$, и количество полученного тепла во много раз больше затраченной работы.

Первая реализация теплового насоса «в металле» была осуществлена Петером Риттингером (Peter Ritter von Rittinger, 1855), но их практическое применение началось с 30-х – 40-х годов XX века трудами многих ученых и инженеров в ряде стран: Холдэйн (J.G.H. Haldane, 1930), Роберт Вебер (Robert C. Webber, 1940), Карл Нильсен (Carl Nielsen, 1948) и др. Самое массовое и известное использование тепловых насосов – отопление помещений от частных домов до огромных концертных залов и общественных зданий за счет «нетрадиционных источников» – низкопотенциального тепла грунта, водоемов, воздуха. В передовых теплонасосных системах реализуется как отопление зимой, так и охлаждение летом.

* На этих рисунках (и в дальнейшем) линии температур $T_{ср}$, $T_{о.пр}$, $T_{н.пр}$ показаны для наглядности – условно, так как температуры T соответствуют действительности, но энтропии S – не соответствуют.

** Иногда про разницу $\epsilon_{хол}$ и $\epsilon_{отоп}$ «забывают».

Дополнительное ускорение внедрению таких разработок придают мировые энергетические и экологические проблемы, которые сейчас повсеместно увязаны с политикой, конкуренцией, конъюнктурой, рекламой, грантовой и прочей государственной и частной финансовой поддержкой, СМИ и пр. Однако это приводит к появлению недобросовестных работ и часто вызывает недоверие к публикуемым результатам. Особенно с учетом выявившихся ранее случаев недостаточной надежности тепловых насосов [14].

Литература по тепловым насосам огромна. Имеются как отдельные издания по тепловым насосам [14–24], так и работы, включающие все 3 группы «трансформаторов тепла»: холодильные машины, тепловые насосы и комбинированные системы нагрева-охлаждения [1, 4, 5, 12, 25–29].

3. Применение тепловых насосов в процессах и аппаратах химической и родственных технологий пока далеко от современного уровня «бренда» по популярности. В общих учебниках и справочниках [30–35 и др.], в том числе в последних американских изданиях основного «учебника Мак-Кэба» (7-е издание 2005 г. [34]) и настольного во всем мире «Справочника инженера-химика Перри» (8-е издание 2007 г., [35]), ни в одном нет специального раздела по тепловым насосам, практически нет их в предметных указателях и нет примеров использования теплонасосных циклов. Классическими, задолго до возникновения «теплонасосного бума», являются и всегда рассматриваются применения компрессии вторичного пара при выпаривании и при ректификации для повышения температуры пара и с использованием его в этой же установке. Иногда их традиционно называют аппаратами с тепловым насосом, но корректнее это именно «термокомпрессия пара» (механическим компрессором или струйным паровым инжектором), без замкнутого теплонасосного цикла и соответственно без специального рабочего вещества. Наиболее характерным, по-видимому, было применение такой термокомпрессии в подвижных опреснительных установках (ПОУ и ОПС), серийно выпускавшихся Тамбовским заводом «Комсомолец» на базе автомашин с отбором мощности для привода роторной паровой турбины от распределителя.

4. Применение тепловых насосов в сушке началось существенно позднее. По сведениям Д.А. Рея [14 и др.] одними из первых применений теплового насоса для сушки и обезвоживания были работы фирмы Зульцер по обезвоживанию и осушке «подземных полостей в Германии в 1943 г.» (!) и зерносушилка, разработанная в США в 1950 г. (!).

Значительная часть работ с применением тепловых насосов как в начале, так и сейчас связана не с обычной конвективной сушкой, а с сублимационной сушкой [36–46], в которой «и так» для замораживания продукта используется холодильная техника, аналогичная теплонасосной. Но в книгах по сублимации тепловые насосы начали упоминаться только в последнее время. Сублимация и десублимация являются фазовыми превращениями и происходят при примерно постоянных температурах, в отличие от нагрева-охлаждения воздуха в конвективных сушилках. Примеры сублимационных сушилок с ТН приведены далее в сводной табл. 2 (п. 17 – пароконденсационный ТН; п. 8 – термоэлектрический ТН). Здесь тепловой насос, так же как в отопительно-кондиционирующих системах, может использоваться как для замораживания, так и для возгонки.

Промышленное применение тепловых насосов в конвективных сушилках пока что является «экзотикой». В ведущих книгах по сушке [47–58] материалы по тепловым насосам включаются, в основном, с 1985 г. Хотя иногда им не придавалось достаточного значения – даже в работах по экономии энергии при сушке (напр., [59]). Особо важные материалы по сушке с ТН изложены, напр., в работах

[14, 20, 52–58, 60–62]. Наиболее публично известное и распространенное применение тепловых насосов в конвективной сушке – сушка древесины (пиломатериалов) в камерах с замкнутой циркуляцией воздуха и конденсационным влагоудалением (пп. 5 и 16, табл. 2) и домашние бельевые стиральные машины с сушкой с компрессионным тепловым насосом (п. 18, табл. 2). Много публикаций также об использовании сушилок с ТН для агропромышленных, пищевых, фармацевтических продуктов, биопрепаратов и других малотоннажных, ценных и термолабильных материалов (примеры см. соответственно в табл. 2, пп. 1–4, 14, 15).

5. Особенности большинства процессов сушки в химической и в ряде родственных отраслей промышленности по сравнению с упомянутыми производствами являются: 1) относительно высокие температуры воздуха (как подаваемого в сушилки, так и выходящего – как правило, выше 120 °С); и 2) относительно высокие производительности по испаряемой влаге (как правило, сотни и тысячи кг/ч) [48, 63–66]. Это приводит ко многим трудностям и проблемам в использовании тепловых насосов: начиная с выбора возможных циклов; далее – величин реальных (и даже идеальных предельных) отопительных коэффициентов (см. п. 2 и далее п. 8); и наконец – хладагентов, компрессоров, теплообменного и влагоотделительного оборудования, пуска-перерывов-останова, использовании низкопотенциального тепла и теплоаккумуляции и т.д., и т.п. Некоторым из этих вопросов посвящены настоящие работы. Разработанный пример проектных схемных решений высокотемпературной высокопроизводительной распылительной сушилки для красителей с парокомпрессионным тепловым насосом на пентане был представлен в работе [65].

6. Перечислим виды холодильных и теплонасосных циклов: термомеханические компрессионные – парокомпрессионные, воздушные (газовые) компрессионные; сорбционные – абсорбционные, адсорбционные; струйные компрессионные – инжекторные; электромагнитные – термоэлектрические (на эффекте Пельтье – выделения/поглощения тепла в месте контакта разнородных проводников с током), магнитокалорические (на эффектах намагничивания–размагничивания), термомангнитные (на эффекте Эттингсхаузена – возникновения градиента температур в проводнике с током в магнитном поле), электрокалорические (изменение температуры сегнетоэлектрика под влиянием электрического поля); химические. Примеры схем с некоторыми из них представлены в табл. 2: парокомпрессионные – пп. 1–6, 13–18; абсорбционные – пп. 9, 10; адсорбционные – п. 12; термоэлектрические – п. 8; химические – п. 11. Для наших целей промышленно-перспективными (в настоящее время) являются только парокомпрессионные и абсорбционные.

Заманчивые, на первый взгляд, для теплонасосных систем газовые (воздушные) компрессионные циклы имеют даже для идеальных циклов отопительный коэффициент в несколько раз ниже, чем у цикла Карно [1]. Это объясняется тем, что такой цикл формируется двумя адиабатами и двумя изобарами (а не изотермами, как в цикле Карно), что приводит к большим энергопотерям.

7. Перечислим теперь основные виды рабочих веществ (хладагентов – в теплонасосных циклах; сушильных агентов – в камерах сушки; иногда те и другие могут совпадать, что обычно весьма желательно): галогенированные предельные углеводороды, бывшие «фреоны» – теперь «хладоны» (C_mH_{2m+2} + с атомами фтора, хлора, брома); «натуральные» метан...пентан; аммиак NH_3 ; углекислый газ CO_2 ; абсорбционные рабочие пары («летучий компонент – абсорбент») – NH_3-H_2O , $H_2O-LiBr$; воздух; перегретый водяной пар; продукты сгорания топлива.

Для нас первичными являются применимость рабочего вещества при требуемых температурах и экономичность. Для парокомпрессионных машин это: 1) критическая температура хладагента – она должна быть возможно выше температуры нагреваемого воздуха $T_{кр} > T_1 > T_{н.пр}$ (см. рис. 1, б) при нечрезмерно высоком критическом давлении; 2) теплота конденсации – парообразования $r_{фаз}$ должна быть также возможно выше. При этом более важным экономически оказывается не давление, а $r_{фаз}$, так как мощность на сжатие газа $N = p_H V_H (k/(k-1))[(p_k/p_H)^{(k-1/k)} - 1]/\eta$ возрастает прямо пропорционально расходу V_H (уменьшается прямо пропорционально $r_{фаз}$), но примерно пропорционально $(p_k/p_H)^{(k-1/k)}$, что для многомолекулярного газа ($k=1,29$) дает степень 0,225 (~ корень 4-й степени) от соотношения давлений p_k/p_H . То есть, при уменьшении в 2 раза $r_{фаз}$ и соответствующем возрастании в 2 раза расхода V_H – потребляемая мощность N увеличится также в 2 раза, но при возрастании в 2 раза соотношения давлений она увеличится примерно в $2^{0,225} = 1,17$ раза, то есть всего на 17 %.

Имеется множество других общих требований к рабочим веществам и хладагентам, рассматриваемым в литературе (см. пристатейный список). Так, в книге Т.В. Морозюк [12] подробно анализируются 6 групп их свойств, а в приложении приведены необходимые для анализа циклов диаграммы состояний $\lg p-i$ для 41 вида рабочих веществ. Для наших условий появляется ряд специальных требований как к рабочим веществам, так и к оборудованию, прежде всего – к компрессорам (начиная с наличия подходящих компрессоров), а также к теплообменному и влагоудаляющему оборудованию.

Для абсорбционных машин [67–69] требования и ограничения для высоких температур по сути дела аналогичны: 1) это комплекс свойств системы «летучий компонент – абсорбент», включающий, прежде всего, термохимическую стойкость в этих условиях, а также связь «растворимость – давление», кристаллизруемость с отложением осадка, вязкость, коррозионные свойства; 2) емкостные теплофизические свойства – теплоты фазовых превращений. В результате для бромистолитиевых машин «в качестве возможной верхней температуры устанавливается 90 °С», в то время как водоаммиачные тепловые насосы считаются «не имеющими температурных ограничений» [68] .

8. Для оценки энергетических возможностей применения тепловых насосов при сушке рассмотрим, как зависит максимальный предельный отопительный коэффициент $\varepsilon_{от}$ (обратного цикла Карно) в сушилке с тепловым насосом от температур входящего $T_{вх}$ и выходящего $T_{вых}$ сушильного агента и от перепада температур в сушилке $\Delta T_c = T_{вх} - T_{вых}$. Примем также соответственно идеальному циклу (см. рис. 1, б) температуры сушильного агента в испарителе и конденсаторе по их длине условно постоянными, а разности температур «сушильный агент – хладагент», необходимые для реализации теплообмена в испарителе и в конденсаторе, равными 10 °С. Тогда получим температуры хладагента в таком цикле (см. рис. 1, б): $T_1 = T_{н.пр} + 10 = T_{вх} + 10$; $T_2 = T_{ср} - 10 = T_{вых} - 10$. Соответственно получаем выражение для количественной оценки предельного отопительного коэффициента

$$\varepsilon_{от} = (T_{вх} + 10)/((T_{вх} + 10) - (T_{вых} - 10)) = (T_{вх} + 10)/(\Delta T_c + 20), \quad (1)$$

где $\Delta T_c = T_{вх} - T_{вых}$, К.

Результаты для наглядности сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки отопительных коэффициентов $\epsilon_{от}$

$\Delta T_c, ^\circ\text{C}$	$T_{вх}, ^\circ\text{C}$									
	50		100		150		200		250	
	$T_{вых}$	$\epsilon_{от}$	$T_{вых}$	$\epsilon_{от}$	$T_{вых}$	$\epsilon_{от}$	$T_{вых}$	$\epsilon_{от}$	$T_{вых}$	$\epsilon_{от}$
10	40	11,1	90	12,8	140	14,4	190	16,1	240	17,8
20	30	8,33	80	9,58	130	10,8	180	12,1	230	13,3
30	—	—	70	7,66	120	8,66	170	9,66	220	10,7
40			60	6,38	110	7,22	160	8,05	210	8,88
50			50	5,47	100	6,19	150	6,90	200	7,61
60			40	4,79	90	5,41	140	6,04	190	6,66
70			—	—	80	4,81	130	5,37	180	5,92
80					70	4,33	120	4,83	170	5,33
90					60	3,94	110	4,39	160	4,85
100					50	3,61	100	4,02	150	4,44
110					—	—	90	3,72	140	4,10
120							80	3,45	130	3,81
130							70	3,22	120	3,55
140							60	3,02	110	3,33
150							—	—	100	3,14
160									90	2,96

Видно, что эффективность цикла и $\epsilon_{от}$ сильно зависят от температуры сушки – при ее увеличении от 50 до 250 $^\circ\text{C}$ (при постоянном $\Delta T_c = 10\text{ }^\circ\text{C}$) $\epsilon_{от}$ увеличивается с 11,1 до 17,8 – улучшается в 1,6 раза (!). Но так же сильно она ухудшается при увеличении температурных перепадов в сушилке (то есть при желательном повышении теплоиспользования сушильного агента) – при температуре сушки 250 $^\circ\text{C}$ уменьшение $T_{вых}$ с 240 до 90 $^\circ\text{C}$ снижает $\epsilon_{от}$ с 17,8 до уже неприемлемой величины 2,96 – в 6 раз (так как в реальном цикле $\epsilon_{от}$ в 2–3 раза ниже идеального).

В действительности в конвективной сушилке температуры теплоотдающего воздуха в испарителе ТН и тепловоспринимающего воздуха в конденсаторе ТН являются переменными и будут требоваться температуры хладагента в цикле: в конденсаторе – выше на величину минимального температурного перепада на конце конденсатора ΔT_{min} ; в испарителе – ниже на ΔT_{min} и на перепад температур охлаждения выходящего воздуха в испарителе $\Delta T_{исп}$. Величины ΔT_c , ΔT_{min} и $\Delta T_{исп}$ зависят от температуры сушки и от конструктивных возможностей оборудования. Оценим их как: $\Delta T_{min} \approx 5\text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_{исп} \approx 10...50\text{ }^\circ\text{C}$. Это даст тогда предельные оценки (аналогично соотношению (1) и табл. 1)

$$\epsilon_{от} = (T_{вх} + 5) / ((T_{вх} + 5) - (T_{вых} - (5 + (10 \div 50)))) = (T_{вх} + 5) / (\Delta T_c + 10 + \Delta T_{исп}). \quad (1a)$$

Из сопоставления соотношений (1) и (1a) видно, что эффективность цикла и $\epsilon_{от}$ существенно уменьшаются при желательном увеличении съема низкопотен-

циального тепла от выходящего в испарителе $\Delta T_{\text{исп}}$, особенно при работе без конденсации влаги из воздуха. При конденсации влаги в испарителе хладоагента по линии насыщения $\varphi = 100\%$ снижение температуры воздуха намного меньше.

Из этих оценок видно, что чем выше температура сушки, тем сложнее использование тепловых насосов: для ее экономичности желательно максимально увеличивать теплоиспользование сушильного агента, то есть снижать температуру выходящего воздуха $T_{\text{вых}}$, но при этом возрастают необходимые перепады температур в тепловых насосах ($T_1 - T_2$) и, соответственно, увеличиваются энергозатраты на сжатие.

Ясно, что наилучшим будет сочетание тепловых насосов с использованием отходящего тепла в рекуператорах, не требующих компрессии. При этом потребуются также частичный дополнительный или пусковой подогрев воздуха в калориферах. При некоторых технологических требованиях (напр., постоянства температуры в сушилке) требуется дополнительный теплоподвод в сушильной камере. При высоких температурах выходящего воздуха его не удастся использовать полностью – тогда возвращаемое избыточное тепло целесообразно использовать для генерации технологического пара (хотя бы минимальных параметров), а также предусматривать аккумуляцию тепла для сглаживания расходов и при перерывах в потреблении (напр., с перегретой водой). Проработки таких вариантов представлены в выполненной и уже упоминавшейся работе [65].

Ближайшие цели последующих работ – выполнение необходимых экспериментов и разработка методов оптимизации упомянутых сочетаний.

9. Перейдем теперь к рассмотрению возможных вариантов комбинированных схем сушки с тепловыми насосами, рекуператорами, калориферами, дополнительными теплообменными устройствами теплоподвода в сушилке и теплосъема от теплового насоса.

Возможны многочисленные разновидности по наличию:

- рекуперативных теплообменников «выходящий воздух – свежий входящий воздух»: нет// есть// тип (в том числе с тепловыми трубами, пластинчатые);
- калориферов: нет (но нужно предусматривать способ пуска – начального разогрева)// есть // количество и расположение, тип (в том числе паровые, газовые, на жидком топливе);
- дополнительного теплоподвода в сушилке: нет// есть// способ теплоподвода (в том числе кондуктивный, инфракрасный, микроволновый);
- дополнительного теплосъема от теплового насоса: нет// есть// наличие и способ теплоиспользования, то же – теплоаккумуляции;
- конденсации влаги из выходящего воздуха: нет, в том числе выше или до точки росы// есть// до какого конечного влагосодержания, способ теплоиспользования и влагоудаления (в том числе поверхностные теплообменники, сепарация, промывные колонны: скрубберы, необходимые также для газоочистки; при их использовании ставится задача водосбережения и уменьшения промстоков);
- выброса воздуха из сушилки и соответственно подвода свежего воздуха: полный выброс, без рециркуляции// частичный выброс, смешение со свежим воздухом и рециркуляция: возможно большинство известных вариантов схем конвективной сушки – со смешением, с промежуточным подогревом, с дополнительным теплоподводом, по нескольким зонам// без выброса (возможен небольшой целевой или неорганизованный выброс-подсос через неплотности), с замкнутой циркуляцией: вид сушильного агента (в том числе остаточный воздух, инертный газ – обычно азот, смесь с продуктами сгорания топлива, перегретый водяной пар из влаги высушиваемого продукта).

Возможны многие сочетания из перечисленных групп схем и устройств.

Один из первичных вопросов – степень использования тепла выходящего из сушилки воздуха, которое складывается из теплосодержания воздуха $c_B T$, пара $c_{П} x T$ и теплоты парообразования $r_0 x$. Приближенно, если считать c и r постоянными, получаем энтальпию влажного воздуха на кг абсолютно сухого воздуха, Дж/кг с.в.,

$$I = (c_B + c_{П} x) T + r_0 x = (1010 + 1970 x) T + 2493000 x. \quad (2)$$

Второе слагаемое обычно существенно больше первого. Например, для температур выходящего воздуха 80, 110 и 150 °С при обычных конечных влагосодержаниях порядка 0,08; 0,11 и 0,15 кг вл./кг с.в. соответственно получаем теплосодержание воздуха и теплоту парообразования 93408 и 199440; 134937 и 274230; 195828 и 373950, то есть влага в виде пара в воздухе содержит тепла примерно в 2 раза больше, чем теплоемкость влажного воздуха (разница может быть и существенно больше).

Рекуперацией можно передать обычно только теплосодержание воздуха, и то не всё, так как для конденсации влаги из выходящего воздуха требуются более низкие температуры подаваемого воздуха. Более низкопотенциальное тепло конденсируемой влаги можно передавать только тепловым насосом.

Но при высоких температурах и влагосодержаниях выходящего воздуха и применении теплового насоса может получиться избыток трансформированного тепла, которое целесообразно использовать для генерации пара или аккумуляции перегретой воды.

Некоторые варианты схем на I – x диаграммах для сравнения и анализа представлены на рис. 2:

а) без теплового насоса, только рекуператор и калорифер для догрева воздуха, без конденсации влаги из воздуха, без рециркуляции воздуха (полный выброс выходящего из сушилки воздуха после рекуператора в атмосферу). На диаграмме отрезки $(2-3) \leftrightarrow (0-0')$ – теплообмен выходящего и входящего свежего воздуха в рекуператоре; $(0'-1)$ – догрев входящего воздуха в калорифере; $(1-2)$ – линия сушки (охлаждение и увлажнение воздуха при отдаче тепла на испарение влаги);

б) только тепловой насос, без рекуператора, калорифер для предварительного нагрева воздуха перед тепловым насосом, без конденсации влаги, без рециркуляции воздуха (полный выброс выходящего из сушилки воздуха после испарителя теплового насоса в атмосферу). На диаграмме: $(2-3) \rightarrow (1'-1)$ – теплоперенос тепловым насосом (через испаритель и конденсатор) тепла от выходящего воздуха к входящему; $(0-1')$ – предварительный нагрев воздуха в калорифере; $(1-2)$ – линия сушки;

в) только тепловой насос, без рекуператора, без калорифера (предусматривается разогрев при пуске), полная конденсация влаги из выходящего воздуха до начального влагосодержания, полная рециркуляция (замкнутый воздушный цикл). На диаграмме: $(2-3-0')$ – охлаждение воздуха и конденсация влаги в испарителе теплового насоса; $(0'-1)$ – нагрев воздуха в конденсаторе теплового насоса; $(1-2)$ – линия сушки. Предусматривается разогрев установки при пуске и дополнительный частичный подвод-отвод тепла для поддержания технологического режима при дисбалансе тепла в системе «сушилка – тепловой насос»; возможен частичный целевой или неорганизованный выброс-подсос воздуха;

г) тепловой насос, рекуператор (начального подогрева воздуха), калорифер (конечного догрева воздуха), теплогенератор (на избытке тепла в конденсаторе

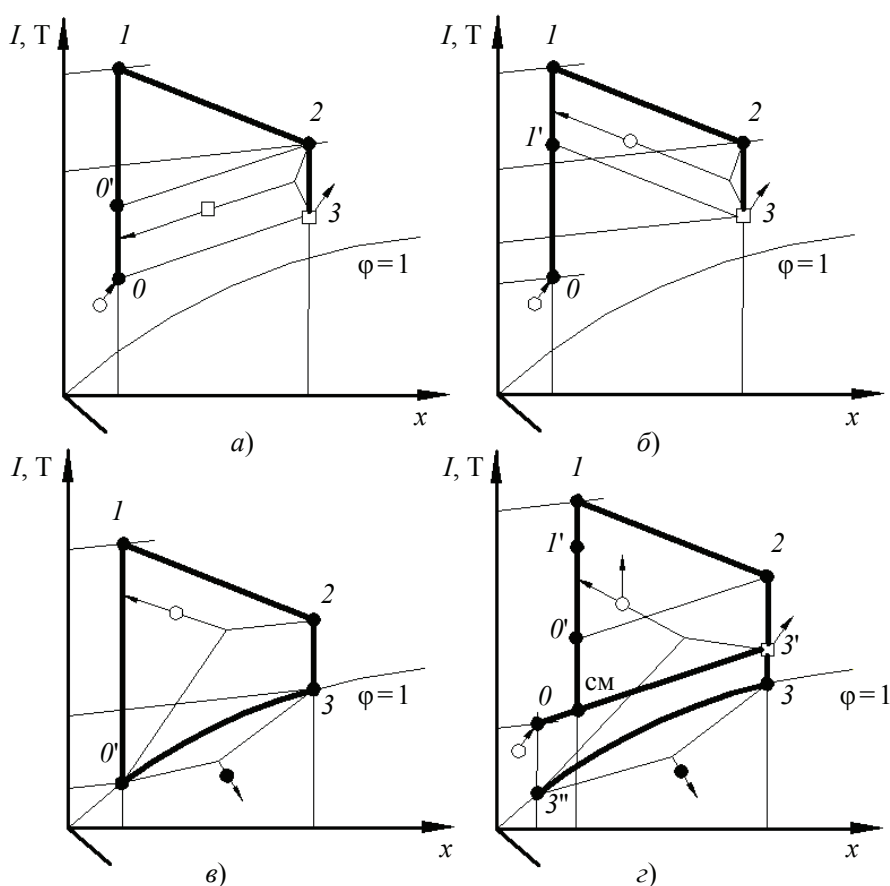


Рис. 2. Варианты а, б, в, г схем конвективной сушки с тепловым насосом на I - x диаграммах:

- → — точка подачи свежего воздуха; □ → — точка выброса отработанного воздуха;
- ▷ ● — область образования и вывода конденсата; ▷ □ — область теплообмена в рекуператоре; ▷ ○ — область теплопереноса в ТН сушилки;
- ▷ ○ — область теплопереноса в ТН сушилки и теплогенератора

ТН), полная конденсация влаги из воздуха, смешение выходящего воздуха со свежим и рециркуляция смеси, выброс части отработанного воздуха и подсос свежего. На диаграмме: $(0-см-3')$ — смешение свежего воздуха и выходящего из рекуператора (охлажденного); $(см-0')$ — начальный подогрев смеси в рекуператоре; $(0'-1')$ — нагрев воздуха в конденсаторе теплового насоса, избыток тепла используется во 2-й части конденсатора для генерации пара (или перегретой воды); $(1'-1)$ — догрев воздуха в калорифере; $(1-2)$ — линия сушки; $(2-3')$ — охлаждение выходящего из сушилки воздуха в рекуператоре; $(3'-3-3'')$ — охлаждение воздуха и конденсация влаги в испарителе теплового насоса.

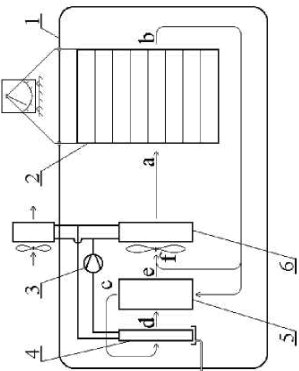
10. Далее приводится сводная выборочная табл. 2, включающая схемы, ссылки, некоторые характеристики экспериментальных, реализованных или разработанных установок с тепловыми насосами, основные результаты и рекомендации. Такая полезная для анализа и выбора решений, подлежащих дальнейшему экспериментальному тестированию. Сведения даются по данным, приведенным в публикациях.

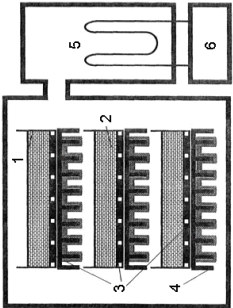
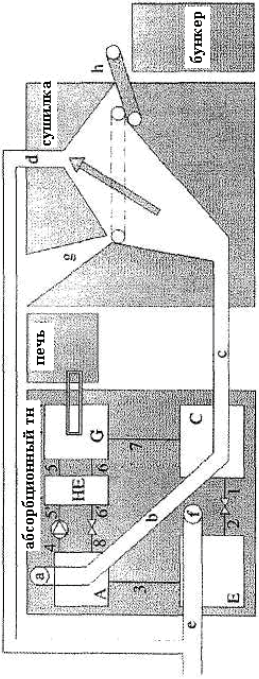
Таблица 2

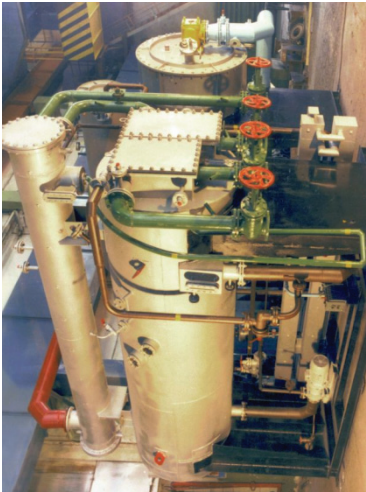
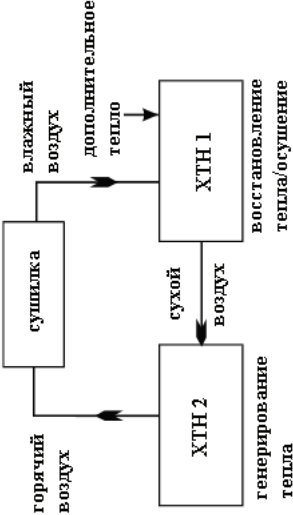
Сводка экспериментально-промышленных установок с тепловыми насосами

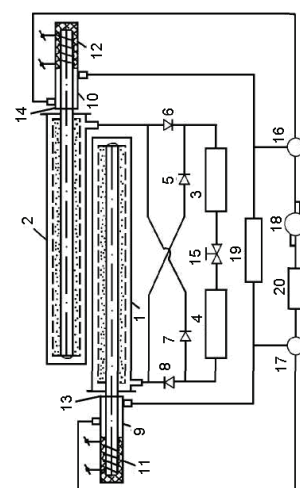
№, наименование, ссылки	Схема (фото) установки	Характеристики, результаты и рекомендации (по данным авторов)
1	2	3
1. Лабораторная установка псевдооживленного слоя с парокомпрессионным ТН (хладагент – аммиак) 2-стадийной сушки фармацевтического протеина. Гузов О.Ю. Рук. Алвес-Фильо О., Алвес-Гончарова С.В., РХТУ, 2008 [70]. Эксперименты проводились в НУНТ, г. Трондхейм, Норвегия	Схема экспериментальной установки 2-стадийной сушки фармацевтического протеина: 1 – съемная сушильная камера; 2 – циклон; 3 – испаритель хладагента; 4 – компрессор; 5 – трехходовой клапан; 6 – внутренний конденсатор хладагента; 7 – внешний конденсатор хладагента; 8 – сборник хладагента; 9 – дроссельный клапан; 10 – вентильатор	Двухстадийная сушка со- стояла из сублимационной (1-я стадия) и тепловой (2-я ста- дия). Наилучшими условиями с точки зрения энергетической эф- фективности установкой и качест- ва продукта рекомендованы: вре- мя сублимационной сушки – 3 ч, время тепловой сушки – 2,5 ч

2. Лабораторная циркуляционная установка с парокомпрессионным ТН (хладагент R-22) для сушки пищевых продуктов (яблоко, томат, агар-агар). Venkatesh Soslе. Рук. G.S.V. Raghavan. Montreal, Canada: McGill Univ., 2002 [62]	Лабораторная циркуляционная установка для сушки пищевых продуктов	ТН мощностью 2,3 кВт марки MAM 024 (Dectron Inc, Монреаль, Канада), винтовой компрессор (Copeland ZR24K3-PFV). Сушильная камера $(0,175 \text{ м}^3; l \times h \times w = 0,7 \times 0,5 \times 0,5 \text{ м})$, материал поликарбонат (GE Lexan), толщина 0,25" (6 мм). Было произведено сравнение между сушкой с ТН и сушкой горячим воздухом (при 45 и 65 °С) с использованием яблочка в качестве тестового материала. Продукты, высушенные с помощью ТН, имели высокие органолептические показатели. Сушка с ТН осуществлялась при более низкой температуре, в результате получается изделие более высокого качества.
---	---	---

1	2	3
6. Лабораторная теплонасосная конвективная сушильная установка (хладагент R-134A) Снежин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Дабижа Н.А., Институт технической теплофизики НАН Украины, 2004 [74]	Схема лабораторной теплонасосной конвективной сушильной установки: 1 – сушильная камера; 2 – тележка; 3 – холодильный компрессор; 4 – испаритель; 5 – рекуперативный теплообменник; 6 – двухсекционный воздушный конденсатор; а – б – насыщение влагой; б – с – предохлаждение в рекуператоре; с – d – охлаждение в испарителе; d – e – нагрев в рекуператоре; e – f и b – f – смешение перед конденсатором; f – a – нагрев в конденсаторе 	Сушилка туннельного типа имеет четыре рабочих зоны, в каждой из которых поддерживаются свои тепловлажностные параметры сушильного агента. Установка предназначена для сушки 450 кг/ч тропических фруктов до влажности 4 % с целью получения из высушенного материала пищевых порошков
7. Тепловой насос на CO₂. Калнинь И.М. – науч. рук., Васютин В.А., Савицкий А.И., Масс А.М., Пустовалов С.Б. МГУ ИЭ, ЭЖИП, 2006 [75, 29]	Тепловой насос ТН CO₂-20 В ОАО «НПО Гелиймаш» построен и испытан пилотный образец ТН CO₂ с тепловой мощностью 20 кВт 	Теплотехнические параметры ТН CO₂-20: общая тепловая мощность 20 кВт; сетевая вода высокотемпературного контура: расход 0,051 кг/с; температура прямого потока 85 °С; температура обратного потока 45 °С; сетевая вода низкотемпературного контура: расход 0,154 кг/с; температура прямого потока 45 °С; температура обратного потока 30 °С. Потребляемая компрессором электрическая мощность 5,9 кВт

8. Вакуум-сушилка с использованием термоэлектрических модулей. Санин В.К., Сафонов Д.И., Цапаев А.П., Сокол П.А. Воронеж: ВГТА, 2002 [76]	Схема вакуум-сублимационной сушилки с использованием термоэлектрических модулей: 1 – противень; 2 – продукт; 3 – термоэлектрические модули; 4 – радиатор холодных спаев; 5 – десублиматор; 6 – холодильная машина Сушилка состоит из секций, каждая из которых представляет собой противень, в двойном дне которого, выполненном из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, установлены термоэлектрические модули. Горячие спаи термобатарей обеспечивают подвод тепла к продукту, а холодные вместе со своими радиаторами – процесс десублимации 	Идея энергосбережения заключается в использовании теплоты десублимации (конденсации) влаги для нагрева при каскадном расположении секций с обрабатываемым продуктом
9. Промышленная конвейерная сушилка с абсорбционным ТН для сушки древесных опилок. Brice Le Lostec, Nicolas Galanis, Jean Baribeault, Jocelyn Millette. Université de Sherbrooke, LTE. Canada, 2008 [77]	Схема промышленной конвейерной сушилки с абсорбционным ТН для сушки древесных опилок: А – абсорбер; G – генератор; С – конденсатор; Е – испаритель; НЕ – теплообменник; g – загрузка; h – выгрузка опилок; с – ввод горячего воздуха; d – выход горячего воздуха; температура окружающего воздуха – 20 °С; относит. влажность 70 % (точка а, см. рис.), расход древесины – 400 кг/ч с влажосодержанием 70 % и температурой 20 °С (точка g, см. рис.); конечное влажосодержание древесины – 10 % (точка h), температура в сушилке – 100 °С (точка с) 	Одноступенчатый абсорбционный ТН может использоваться при температуре сушильного агента ниже 60 °С. Иначе, должен использоваться двухступенчатый абсорбционный ТН. В [68] описана 2 схемы с абсорбционными ТН, обеспечивающие температуры 150 °С

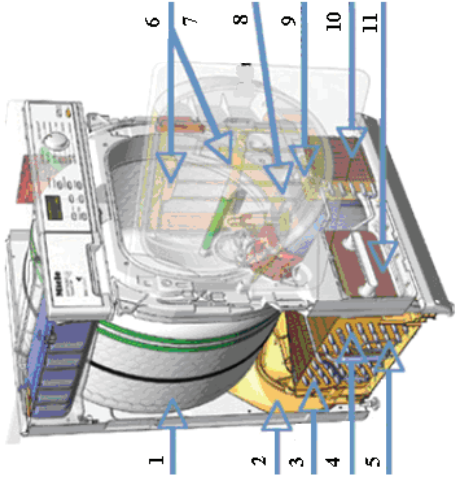
1	2	3
10. Абсорбционный ТН на LiBr. Горшков В.Г., Паздников А.Г., Мухин Д.Г., Севастьянов Р.В., Попов А.В. Новосибирск: ИТФ СО РАН, Тепло-СибМаш; СПб: ГУНПТ, 2008 [78, 23]	 Мощный абсорбционный ТН на LiBr	Абсорбционные машины нового поколения имеют высокую надежность, длительный срок службы, низкую удельную металлоемкость, высокую компактность и полную заводскую готовность при поставке
11. Сушилки с химическим тепловым насосом. Hironao Ogura, Eri Ozawa, Marie Tsuchida, Miharu Kazama; Jun-Hee Lee, Yasufumi Otsubo. Japan, Thailand, 2008–2009 [79–81]	 Схема сушилки с химическим насосом на реакции гидратации/дегидратации $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$	Из многочисленных химических реакций выбрана реакция гидратации/дегидратации $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ как наиболее приемлемая для экспериментов и моделирования. Предложен ХТН – контейнер для накопления энергии и дальнейшего ее транспортирования без потерь. Изучены характеристики сушки $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с целью получения CaSO_4 в качестве материала для работы химического ТН

12. Адсорбционный тепловой насос. Васильев Л.Л. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2005 [82]	Схема адсорбционного теплового насоса:  1, 2 – адсорберы; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5–8 – вентили; 9–10 – жидкостные теплообменники; 11–12 – испарители тепловых труб с электронагревателями; 13–14 – тепловые трубы; 15 – дроссель; 16–17 – вентили; 18 – насос; 19 – ротаметр; 20 – термостат	В качестве сорбентов могут использоваться активированные угли, цеолиты, силикагели. Последние годы рассматриваются возможности использования силикагелей совместно с солями металлов. Большой интерес при создании тепловых насосов представляют активированный уголь и аммиак, а также активированное углеродно и аммиак, цеолит и вода.
13. Каскадный пароконденсационный тепловой насос. Панкосьянов Д.Н. Рук. Дыскин Л.М. Н. Новгород: НГАСУ, 2010 [83]	 Каскадный пароконденсационный тепловой насос: нижняя ступень – рабочее тело R-22; верхняя ступень – рабочее тело R-134A	Нижняя ступень: холодопроизводительность испарителя 2,801 кВт, расход рабочего тела 58,9 кг/ч, мощность электродвигателя компрессора 1,17 кВт. Верхняя ступень: теплопроизводительность конденсатора 5,345 кВт, расход рабочего тела 112,1 кг/ч, мощность электродвигателя компрессора 1,91 кВт. Теплопроизводительность охладителя пара 3,172 кВт. Диапазон изменения температур испарения –30...0 °С (для первой ступени) и конденсации 40...85 °С (для второй ступени)

1	2	3
14. Лабораторная конвейерная сушилка с ТН (хладагент R-407C). Arif Nerbasli, Neslihan Colak, Ebrur Hancioglu, Filiz Icier, Zafer Erbay. Saudi Arabia, Turkey, 2010 [84]	Лабораторная конвейерная сушилка с ТН Экспериментальная установка состоит из винтового компрессора, 2-х конденсаторов (внутреннего и внешнего), сушильной камеры, модуля регенерации тепла	Размер сушильной камеры: 3,0×3,0×1,0 м. Температуры сушильного агента: 45, 50, 55 °С. Скорость сушильного агента: 1,5 м/с. Влагосодержание свежих и высушенных слив 84,49 %±1,10 и 15,70 % ± 2,56 соответственно. Теоретические значения COP 3,92–4,35 и практические значения COP 2,56 до 2,81
15. Сушилка с ТН для высушивания грибов-трутовиков семейства Ганодермовых. Siew Kian Chin; Chung Lim Law. Malaysia: 2010 [85]	Схема экспериментальной установки: 1 – насос; 2 – компрессор; 3 – теплообменник (вода/хладагент); 4 – клапан; 5 – клапан; 6 – испаритель (хладагент/горячий влажный воздух); 7 – теплообменник (холодный сухой воздух/горячая вода); 8 – вентилятор; 9 – калорифер; 10 – сушильные камеры A/B; 11 – клапан; 12 – горячий влажный воздух; 13 – холодный сухой воздух; 14 – горячий сухой воздух. Сушилка работает в осциллирующем режиме	Определено влияние режима осцилляции на сохранение растворимости полисахаридов и изменения цвета высушенного продукта. Показано, что непрерывная сушка с ТН и нагревателем уменьшает потерю водорастворимых полисахаридов в высушенном продукте

16. Сушильная камера конденсационного типа с использованием теплового насоса для сушки мягких и твердых пород древесины. Васильев Г.П. науч. рук. М.: Инсолар-Инвест, 2010 [86]	 Сушильная камера конденсационного типа с использованием теплового насоса для сушки мягких и твердых пород древесины Сушка древесины с помощью теплового насоса происходит без воздухообмена с внешней средой. Замкнутый цикл и мягкий режим создают благоприятные условия для сушки пиломатериалов без возникновения трещин, внутреннего напряжения, пережигания сучков и т.д., в том числе и при работе с твердыми породами. Насыщенный влагой сушильный агент проходит через теплообменник – испаритель теплового насоса, часть влаги конденсируется, охлаждаясь до температуры ниже точки росы, и выводится наружу, а произведенное тепло вместе с теплотой выпаривания применяется для обогрева камеры. Температура не более 55 °С	Емкость сушилок 12–15 м³. Тепловая мощность 12,9 кВт. Потребляемая мощность, тах 4,7 кВт. Расход воздуха вентиляторов 2600 м³/ч. Среднее потребление электроэнергии 0,5 кВт·ч (12 кВт·ч за сутки). Время сушки: дуб 3000 × 300 × 80 мм $W_H = 45\%$ $W_K = 10\%$ – 25 суток; сосна 4500 × 150 × 150 мм $W_H = 22\%$ $W_K = 7\%$ – 5 суток
--	---	--

1	2	3
17. Лабораторная вакуум-сублимационная установка с использованием теплового насоса. Бокадаров С.А. Рук. Доброммиров В.Е. Воронеж: ВГТА, 2010 [87]	Схема пилотной вакуум-сублимационной установки: 1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – терморегулирующий вентиль; 4 – корпус сушилки; 5 – десублиматор; 6 – теплопередающее устройство; 7 – бароман; 8 – поддон; 9 – пульт управления; вращение барабана 5–15 мин⁻¹	Сублимационное обезвреживание продукта проводилось при температуре десублиматора –60...–40 °С, остаточном давлении в сублиматоре 100...150 Па. Продукт – экстракт левзеи сафлоровидной. В качестве теплоносителя использовался хладагент, нагретый в компрессоре холодильной машины

18. Бытовая стиральная машина Miele с сушилкой с тепловым насосом конденсационного типа. Фирма Miele, Германия – производитель бытовой техники и оборудования, 2011 [88]	 <i>a)</i>  <i>б)</i> Бытовая стиральная машина Miele с сушилкой с тепловым насосом конденсационного типа: <i>a</i> – сушильная машина Miele T 8967 WP RU LW EcoComfort; <i>б</i> – схема сушильной машины Miele T 8627 WP EcoComfort; 1 – сотовый барабан; 2 – вентилятор; 3 – жидкий хладагент; 4 – испаритель; 5 – капиллярная трубка; 6 – поверхностный фильтр; 7 – фильтр тонкой очистки; 8 – компрессор; 9 – вентилятор охлаждения хладагента; 10 – конденсатор; 11 – фильтр тонкой очистки	«Деликатная система сушки для бережной и энергосберегающей сушки». Класс энергоэффективности А. Загрузка 1–8 кг. Параметры: 1000 об/мин; 2,3 кВт; 1400 об/мин; 1,95 кВт. Выпускаются многими производителями (Bosch, Indesit, LG, Miele, Siemens и др.), в том числе в России
--	--	--

В заключение данной статьи отметим, что дальнейшие работы и публикации планируется выполнять с учетом выработанных на кафедре «Технологические процессы и аппараты» ТГТУ общих подходов к энергосбережению [65, 89] и методологии исследования сушильных процессов на базе температурно-влажностных зависимостей [90, 91].

Список литературы

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 4-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
2. Ястржембский, А.С. Термодинамика и история ее развития / А.С. Ястржембский. – М. ; Л. : Энергия, 1966. – 668 с.
3. Гельфер, Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики / Я.М. Гельфер. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 536 с.
4. Мааке, В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 1142 с. (рус. перевод со 2-го французского издания варианта «Польманна» 1993 г.; впервые «Польманн» был издан в виде календаря-ежедневника для специалистов-холодильщиков в Германии в 1908 г.; всего вышло 18 нем. изданий).
5. ASHRAE Handbook (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Handbook). In 4 Vol.: Fundamentals, Refrigeration, Applications, Systems and Equipment. – New York : ASHRAE (выпускается с 1922 г.; ежегодно перерабатывается и переиздается 1 том; последние издания: 2010 ASHRAE Handbook – Refrigeration; 2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals; 2008 ASHRAE Handbook – Systems and Equipment; 2007 ASHRAE Handbook – Applications; выпускаются: SI-издание, Inch-Pound-издание, CD-ROM, а также ASHRAE Handbook ONLINE [Электронный ресурс], режим доступа к журналу: <http://www.ashrae.org/publications/page/2298>).
6. Комаров, Н.С. Холод / Н.С. Комаров. – 5-е изд. – М. : Гизлегпищепром, 1953. – 703 с.
7. Розенфельд, Л.М. Холодильные машины и аппараты / Л.М. Розенфельд, А.Г. Ткачев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Госторгиздат, 1960. – 656 с.
8. Холодильная техника. Энциклопедический справочник : в 3 кн. / гл. ред. Ш.Н. Кобулашвили, ред. И.С. Бадылькес [и др.]. – М. : Госторгиздат, 1960–1962. – 3 кн.
9. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / М.П. Малков [и др.] – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
10. Чумак, И.Г. Холодильные установки / И.Г. Чумак, В.П. Челурненко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1991. – 495 с.
11. Курылев, Е.С. Холодильные установки / Е.С. Курылев, В.В. Оносовский, Ю.Д. Румянцев – 2-е изд. – СПб. : Политехника, 2002. – 676 с.
12. Морозюк, Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т.В. Морозюк. – Одесса : Студия «Негоциант», 2006. – 764 с.
13. Брайдерт, Г.-Й. Проектирование холодильных установок. Расчеты, параметры, примеры : пер. с нем. / Г.-Й. Брайдерт. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.
14. Рей, Д. Тепловые насосы : пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайл. – М. : Энергоиздат, 1982. – 224 с.
15. Гельперин, Н.И. Тепловой насос / Н.И. Гельперин. – Л. : Госнаучтехиздат, 1931. – 152 с.
16. Гохштейн, Д.П. Использование отходов тепла в тепловых насосах / Д.П. Гохштейн – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 80 с.
17. Мартыновский, В.С. Тепловые насосы / В.С. Мартыновский – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1955. – 192 с.
18. Янтовский, Е.И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е.И. Янтовский, Ю.В. Пустовалов – М. : Энергоиздат, 1982. – 143 с.
19. Langley, Billy C. Heat pump technology: systems design, installation, and troubleshooting / Billy C. Langley. – 2nd ed. – Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1989. – IX. – 404 p.
20. Янтовский, Е.И. Промышленные тепловые насосы / Е.И. Янтовский, Л.А. Левин. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
21. Бубялис, Э. Процессы энергопереноса в тепловых насосах / Э. Бубялис, В. Макарявичус – Вильнюс : Мокслас, 1990. – 183 с.
22. Miles, Lee. Heat pumps: theory and service / Lee Miles. – Albany, N.Y. : Delmar Publ., 1994. – XIV. – 397 p.
23. Горшков, В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор / В.Г. Горшков // Справ. пром. обо-

рудования. – 2004. – № 2. – С. 47–80. **24.** Амерханов, Р.А. Тепловые насосы / Р.А. Амерханов. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 160 с. **25.** Мартыновский, В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / В.С. Мартыновский. – М. : Энергия, 1979. – 288 с. **26.** Соколов, Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М. : Энергоиздат, 1981. – 320 с. **27.** Быков, А.В. Холодильные машины и тепловые насосы. Повышение эффективности / А.В. Быков, И.М. Калнинь, А.С. Крузе. – М. : Агропромиздат, 1988. – 286 с. **28.** Везиришвили, О.Ш. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло- и хладоснабжения / О.Ш. Везиришвили, Н.В. Меладзе. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1994. – 160 с. **28a.** Голев, И.М. Теоретические основы работы трансформаторов тепла / И.М. Голев, Н.А. Андреева. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. техн. ун-та, 2003. – 143 с. **29.** Калнинь, И.М. Термодинамические циклы холодильных машин и тепловых насосов. Расчет. Оценка эффективности / И.М. Калнинь, К.Н. Фадеков. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та инженер. экологии, 2006. – 92 с. **30.** Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., дораб. – М. : Альянс, 2004. – 753 с. (перепеч. с изд. 1973 г.).

31. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – 3-е изд, перераб. и доп. – М. : Химия, 1987. – 496 с. **32.** Общий курс процессов и аппаратов химической технологии : в 2 кн. / под ред. В.Г. Айнштейна. – 2-е изд. – М. : Химия, 2002. – 2 кн. **33.** Фролов, В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В.Ф. Фролов. – СПб. : Химиздат, 2003. – 608 с. **34.** McCabe, Warren L. Unit operations of chemical engineering / Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott. – 7th Ed. – Boston : McGraw-Hill, 2005. – XXV. – 1140 p. (1-е издание 1956 г.; 1-й учебник Бэджера и Мак-Кэба вышел в 1931 г.). **35.** Perry's Chemical Engineers' Handbook. – 8th Ed. / Ed. Don W. Green. – New York : McGraw-Hill, 2007. – (1-е издание 1934 г. Нумерация страниц – по 25 разделам, всего 2650 с. В том числе раздел 24. Энергоресурсы, конверсия и утилизация, 58 с.). **36.** Лыков, А.В. Молекулярная сушка / А.В. Лыков, А.А. Грязнов. – М. : Пищепромиздат, 1956. – 272 с. **37.** Шумский, К.П. Основы расчета вакуумной сублимационной аппаратуры / К.П. Шумский, А.И. Мялкин, И.С. Максимовская. – М. : Машиностроение, 1967. – 224 с. **38.** Гинзбург, А.С. Оборудование для сублимационной сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, Б.М. Леховицкий. – М. : ЦНИИТЭИ, 1970. – 271 с. **39.** Гуйго, Э.И. Сублимационная сушка в пищевой промышленности / Э.И. Гуйго, Н.К. Журавская, Э.И. Каухчешвили. – 2-е изд. – М. : Пищевая пром-сть, 1972. – 433 с. **40.** Лебедев, Д.П. Тепло- и массообмен в процессах сублимации в вакууме / Д.П. Лебедев, Т.Л. Перельман. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

41. Mellor, J.D. Fundamentals of Freeze-Drying / J.D. Mellor. – London : Academic press, 1978. – 380 p. **42.** Орехов, И.Н. Холод в процессах химической технологии / И.Н. Орехов, В.Д. Обрезков. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 256 с. **43.** Камовников, Б.П. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов. Основы теории, расчет и оптимизация / Б.П. Камовников, Л.С. Малков, В.А. Воскобойников. – М. : Агропромиздат, 1985. – 288 с. **44.** Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов / Б.П. Камовников [и др.]. – М. : Колос, 1994. – 253 с. **45.** Oetjen, Georg-Wilhelm Freeze-drying / Georg-Wilhelm Oetjen, Peter Haseley. – 2nd Ed. – Weinheim : Wiley, 2004. – XII. – 395 p. **46.** Семенов, Г.В. Современное состояние и перспективы развития технологий и оборудования вакуумной сублимационной сушки в стране и за рубежом / Г.В. Семенов, Е.И. Титов // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ–2008 : тр. третьей междунар. науч.-практ. конф., Москва – Тамбов, 16–20 сент. 2008 г. : в 2 т. – М., 2008. – Т. 1. – С. 18–31. **47.** Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1968. – 472 с. (1-е изд. 1950 г., 416 с.). **48.** Лыков, М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков – М. : Химия, 1970. – 430 с. **49.** Keey, R.B. Drying. Principles and Practice / R.B. Keey – Oxford : Pergamon, 1975. – 376 p. **50.** Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.

51. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с. 52. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М. : Агропромиздат, 1985. – 336 с. 53. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М. : Химия, 1988. – 352 с. 54. Strumillo, C. Drying: principles, applications, and design / C. Strumillo, T. Kudra. – New York : Gordon and Breach, 1986. – XX. – 448 p. 55. Keey, R.B. Drying of Loose and Particulate Materials / R.B. Keey. – New York : Hemisphere, 1992. – X. – 504 p. 56. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М. : Наука, 1997. – 448 с. 57. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar (Ed.). – 3rd Ed. – New York : Taylor & Francis, 2007. – 1280 p. (в том числе содержит разделы: 11. Сублимационная сушка, с. 257–284; 46. Энергетические аспекты в сушке, с. 1075–1102; 47. Теплонасосные сушильные системы, с. 1103–1132). 58. Kudra, T. Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A.S. Mujumdar. – 2nd Ed. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, Taylor & Francis, 2008. – 457 p. (в том числе содержит разделы: 15. Сушка с тепловыми насосами, с. 263–292; 21. Атмосферная сублимационная сушка, с. 327–336; 22. Распылительная сублимационная сушка, с. 337–342; 31. Радиочастотная сушка с тепловым насосом, с. 405–410; 33.3. Инфракрасная сушка с тепловым насосом, с. 418). 59. Данилов, О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с. 60. Чайченец, Н.С. Теплонасосные сушильные установки для зерна / Н.С. Чайченец. – М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1990. – 53 с.

61. Alves-Filho, Odilio. Heat pump drying of fruits and roots. The influence of heat and mass transfer on dryer characteristics : Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology. – Trondheim, Norway, 1996. – 120 p. 62. Sosle, Venkatesh. A heat pump dehumidifier assisted dryer for agri-foods : Ph.D. Thesis, McGill University. – Montreal, Canada, 2002. – 120 p. 63. Сушильные аппараты и установки : каталог НИИХиммаш. – М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. – 80 с. 64. Коновалов, В.И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В.И. Коновалов, А.М. Коваль. – М. : Химия, 1989. – 224 с. (Рецензия в «Drying Technology – An Intern. Journal». – New York : Dekker, 1990, V. 8, No. 1. – P. 225–226). 65. Коновалов, В.И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В.И. Коновалов, Н.Ц. Гагапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796–811. 66. Современное оборудование для комбинированной кондуктивно-конвективной сушки и термообработки / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 579–583. 67. Орехов, И.И. Абсорбционные преобразователи тепла / И.И. Орехов, Л.С. Тимофеевский, С.В. Караван. – Л. : Химия, 1989. – 208 с. 68. Галимова, Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы : курс лекций / Л.В. Галимова. – Астрахань : Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 1997. – 226 с. 69. Цирлин, А.М. Термодинамический анализ и оптимизация абсорбционного холодильного цикла / А.М. Цирлин, И.Н. Григорьевский, Д.В. Зубов // Теорет. основы хим. технологии. – 2009. – Т. 43, № 6. – С. 658–664. 70. Гузев, О.Ю. Разработка высокотехнологичного процесса сушки в псевдооживленном слое с использованием теплового насоса (на примере сушки фармацевтического протеина) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / О.Ю. Гузев. – М., 2008. – 18 с.

71. Иванов, В.В. Разработка и научное обеспечение способа сушки солода в двухступенчатой теплонасосной сушильной установке : автореф. дис. ... канд. техн. наук. : 05.18.12 / В.В. Иванов. – Воронеж, 2007. – 20 с. 72. Joshi, V. Inactivation kinetics of lactobacillus acidophilus using heat pump assisted and fluidized bed drying / V. Joshi, S. Jangam, B. Thorat // Proc. 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2009), October 19–21, 2009, Bangkok, Thailand. – P. 279–287. 73. Lee, Kong Hoon. Drying performance simulation of a two-cycle heat pump dryer for high temperature drying / Kong Hoon Lee, Ook Joong Kim, Jong-Ryul Kim // 16th International Drying Symposium (IDS 2008), Hyderabad, India, 9–12 November 2008. – P. 958–964. 74. Снежкин, Ю.Ф. Обезвожива-

ние коллоидных капиллярно-пористых материалов в условиях высоковлажной окружающей среды [Электронный ресурс] / Ю.Ф. Снежкин, Д.М. Чалаев, Н.А. Дабижа // 5-й Минский Международный форум по тепло- и массопереносу. – ММФ–2004 : тезисы, 24–28 мая 2004 г., Минск, Беларусь. – Т. 2. – С. 256–258. – Режим доступа : <http://www.itmo.by/forum/mif5/S07/7.html>. – Загл. с экрана. **75.** Калнинь, И.М. Создание тепловых насосов нового поколения на диоксиде углерода (R744) [Электронный ресурс] / И.М. Калнинь, С.Б. Пустовалов, А.И. Савицкий // В мире науки. – 2006. – Октябрь, № 10. – Режим доступа : <http://www.sciam.ru/2006/10/Sciencertf2.shtml>. – Загл. с экрана. **76.** Вакуум-сублимационная сушка продуктов с использованием термоэлектрических модулей [Электронный ресурс] / В.К. Санин [и др.]. – Режим доступа : http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_best_article_issue_5_2007.htm. – Загл. с экрана. **77.** Wood chip drying with an absorption heat pump / B. Le Lostec [et al.] // Energy. – 2008. – Vol. 33. – P. 500–512. **78.** Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения [Электронный ресурс] / Горшков В.Г. [и др.]. – Режим доступа : <http://www.teplosbmash.ru/articles/id/11/>. – Загл. с экрана. **79.** Kudra T. Heat-Pump Drying / T. Kudra // Advanced Drying Technologies / T. Kudra, A.S. Mujumdar. – 2nd Ed. – New York, 2008. (см. также [58]). **80.** Ogura, Hironao. Chemical energy transportation for drying by waste energy recyclic utilization / Hironao Ogura, Eri Ozawa, Marie Tsuchida, Miharu Kazama // 4th Inter-American Drying Conference, Montreal, August 23–27, 2009. – P. 465–470.

81. Lee, Jun-Hee. Drying and dehydration characteristics of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ for preparing CaSO_4 as chemical heat pump materials / Jun-Hee Lee, Yasufumi Otsubo, Hironao Ogura // 6th Asia-Pacific Drying Conference (ADC 2009), October 19–21, 2009, Bangkok, Thailand. – P. 232–236. **82.** Васильев, Л.Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / Л.Л. Васильев // Электрон. журн. энергосервис. компании «Экологические системы». – 2005. – № 7. – Режим доступа : <http://esco-ecosys.narod.ru/index.htm>. – Загл. с экрана. **83.** Панкосьянов, Д.Н. Обоснование использования каскадных тепловых насосов в системах теплоснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Д.Н. Панкосьянов. – СПб., 2010. – 27 с. **84.** Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer / Arif Hepbasli [et al.] // Drying Technology. – 2010. – Vol. 28. – P. 1385–1395. **85.** Chin Siew Kian Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill / Siew Kian Chin, Chung Lim Law // Drying Technology. – 2010. – Vol. 28. – P. 1457–1465. **86.** Группа компаний «ИНСОЛАР» – тепловые насосы и энергоэффективные теплонасосные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.insolar.ru. – Загл. с экрана. **87.** Бокадаров С.А. Исследование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания экстракта левзеи сафлоровидной с использованием низкопотенциального источника энергии : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / С.А. Бокадаров. – Воронеж, 2010. – 23 с. **88.** Официальный сайт производителя бытовой техники и оборудования компании Miele в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.miele.ru>. – Загл. с экрана. **89.** Современные аналитические подходы к энергосбережению. Интегрированный подход. Пинч-анализ. Луковичная модель / В.И. Коновалов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 560–578. **90.** Konovalov, V.I. Guest Editorial. Drying R&D needs: basic research in drying of capillary-porous materials / V.I. Konovalov // Drying Technology- an Intern. Journal. – 2005. – Vol. 23, No. 12. – P. 2307–2311.

91. Konovalov, V.I. Some generalized and particular issues on modeling of complex drying processes based on temperature-moisture relationships : in 3 parts / V.I. Konovalov, T. Kudra, N.Z. Gatapova // 17th Intern. drying symposium (IDS–2010), Magdeburg, Germany, 3–6 October 2010. – Part 1. General statements. – Vol. A. – P. 478–485 ; Part 2. Specific targets. Thermally-thin bodies. – Vol. A. – P. 248–256 ; Part 3. Specific targets. Drying with essential temperature kinetics. – Vol. B. – P. 786–794.

Drying with Heat Pumps in Chemical Industry: Opportunities and Experimental Technics

V.I. Konovalov, E.V. Romanova, N.Ts. Gatapova

*Department "Industrial Processes and Apparatus, TSTU;
kvipri@ce.tstu.ru*

Key words and phrases: energy saving; heat pump; heat transformation; high performance driers; high-temperature drying.

Abstract: The paper analyzes the possibility of energy saving with the use of heat pumps of various types in the dryers of chemical industry at high temperature and performance. The necessity of experimental verification for all individual cases is shown. In order to analyze and select the laboratory solutions the custom table summarizes the published characteristics of experimental, implemented or developed plants.

Trocknen mit den Wärmepumpen in der chemischen Industrie: Möglichkeiten und experimentelle Technik

Zusammenfassung: Es werden die Fragen der Energiesparung mit der Benutzung der Wärmepumpen der verschiedenen Typen in den Trockenanlagen der chemischen Produktion bei den hohen Temperaturen und Produktivitäten betrachtet. Es ist die Notwendigkeit der experimentellen Prüfung für alle konkreten Fälle gezeigt. Für die Analyse und die Auswahl der Laborlösungen wird die zusammengefasste Arbeitstabelle und die veröffentlichten Charakteristiken der experimentellen, realisierten und erarbeiteten Anlagen angeführt.

Séchage avec des pompes thermiques dans l'industrie chimique: possibilités et technique expérimentale

Résumé: Sont examinés les possibilités de la conservation de l'énergie avec l'emploi des pompes thermiques de différents types dans les installations de séchage de l'industrie chimique lors de hautes températures et productivité. Est montrée la nécessité du contrôle expérimental pour tous les cas concrets. Pour l'analyse et le choix des solutions de laboratoire est donnée une liste générale ainsi que les caractéristiques publiées des installations expérimentales réalisées ou élaborées.

Авторы: *Коновалов Виктор Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Романова Елена Васильевна* – аспирант кафедры «Технологические процессы и аппараты»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы и аппараты», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», ГОУ ВПО «ТГТУ».