

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА**

На правах рукописи

**МОЙНУДДИН ХАСАН МОХАММАД**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ВОДЫ ИЗ ВЛАГИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА**

Специальность **05.04.03** - Машины и аппараты холодильной  
и криогенной техники и систем  
кондиционирования

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1997

621.5



Работа выполнена в Одесской Г

- Научные руководители:
- заслуженный деятель науки и техники УССР, доктор технических наук, профессор В.П.Чепурненко
  - кандидат технических наук, доцент А.Е.Лагутин

- Официальные оппоненты:
- доктор технических наук, профессор А.В.Дорошенко
  - кандидат технических наук, старший научный сотрудник Н.Н.Дидык

- Ведущая организация:
- Физико-химический институт Национальной академии наук Украины

Защита состоится "1" июля 1997 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании специализированного Совета Д.05.20.01 при Одесской Государственной Академии Холода по адресу: 270100, г.Одесса, ул. Дворянская, 1/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ.

Автореферат разослан 30 мая 1997 года.

Ученый секретарь  
специализированного Совета  
д.т.н., проф.

В.А.Календерьян

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Земля богата водой, почти три четверти запасов воды содержится в Мировом океане. Пригодная к употреблению вода распределена неравномерно. Около одного миллиарда людей в сельскохозяйственных регионах, в том числе в регионах с высокой плотностью населения - странах Азии, Африки, Латинской Америки располагают столь скудными ресурсами питьевой воды, что часть из них не всегда располагает даже жизненно необходимым суточным минимумом 2-3 литра на человека.

При росте населения Земного шара, резервы пресной воды на Земле остаются неизменными. Море со своими неисчерпаемыми запасами воды, как сырьевой источник номер один, в будущем должно стать основой в обеспечении водой потребностей человечества.

В районах пустынь, которые простираются на расстоянии свыше 30000 км вдоль побережья Мирового океана, получение пресной воды из соленой представляет собой единственную альтернативу для восполнения отсутствующих природных запасов воды.

В ряде стран - США, Японии, Германии и т.д. уже созданы и успешно используются крупные установки для опреснения морских вод. Однако можно освоить и обширные, удаленные от побережья, площади в засушливых районах, если для снабжения использовать грунтовые воды, которые часто имеются в больших количествах, но засолены.

Помимо отмеченных глобальных проблем по обеспечению потребностей человечества в питьевой воде существуют условия, где необходимы мобильные установки для водоснабжения небольших экспедиций (2-3 человека) жизненно небольшим суточным минимумом пресной воды удовлетворительного качества. Наиболее актуальна эта проблема в безводных и засушливых районах Земного шара, удаленных от источников соленых вод.

В этих условиях единственной альтернативой для восполнения отсутствующих природных запасов воды является влага, содержащаяся в атмосферном воздухе. При анализе возможных методов получения воды из влаги атмосферного воздуха в качестве критерия их оценки принята энергоемкость и мобильность системы. В этом случае минимум потребной мощности, необходимый для устойчивой работы установки, должен быть обес-

ДНЕ И В С  
АНУ

печен приемлемыми источниками энергопотребления (ветровые двигатели, преобразователи тепловой энергии и т.д.).

Вышеизложенное определяет актуальность проблемы выбора наиболее экономичного мобильного устройства для получения воды из влаги атмосферного воздуха.

Поставленная цель обуславливает решение следующих задач:

- разработку математической модели по оценке энергетической эффективности механического осушителя воздуха, при переменных температурно-влажностных условиях его эксплуатации;
- экспериментальную оценку влияния термического сопротивления пленки конденсата на тепловые характеристики воздухоохладителя механического осушителя воздуха;
- анализ возможных альтернативных устройств для получения воды из влаги атмосферного воздуха;
- сопоставление рассматриваемых устройств.

Научная новизна работы. На основании результатов экспериментального исследования установлено, что термическое сопротивление пленки конденсата образующейся на поверхности воздухоохладителя, механического осушителя воздуха, не зависит от интенсивности процесса массопереноса.

Теоретически обосновано наиболее приемлемое мобильное устройство для получения воды из влаги атмосферного воздуха при низких значениях его влагосодержания.

Научное положение, защищаемое в работе. Единственным мобильным (передвижным) устройством для получения воды из влаги атмосферного воздуха в пустынных и безводных районах Земного шара является механический осушитель воздуха.

Научные результаты, полученные в работе.

1. Разработана математическая модель взаимодействия элементов холодильной машины механического осушителя воздуха, позволяющая в любых температурно-влажностных условиях определить энергоемкость его эксплуатации.

2. На основании энергетических сопоставлений различных устройств получены рекомендации по выбору наиболее эффективных конструкций.
3. Установлены факторы, не оказывающие существенного влияния на интенсивность теплопереноса в поверхностных воздухоохладителях.

Практическая ценность работы. Полученные данные могут быть использованы при обосновании целесообразности создания различных устройств для получения воды из влаги атмосферного воздуха.

Разработанная математическая модель может быть использована при проектировании механических осушителей воздуха для различных условий их эксплуатации.

Апробация работы. Отдельные положения выполненного исследования были изложены в докладах, представленных на научно-технических конференциях:

- "Теория и практика вузовской науки 60-й учебно-методической и научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и студентов Одесской Государственной Академии Холода" - Одесса - 1995 г.
- "Холод и пищевые производства" - Санкт-Петербург - 1996 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и основных выводов. Работа содержит **137** страниц машинописного текста, **38** рисунков и **19** таблиц. Список литературы включает **88** наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен обзор климатологии безводных районов Земли и определен рабочий диапазон температурно-влажностных условий. Рассмотрены физические основы, устройства и методы получения воды из влаги атмосферного воздуха. Отмечены обнаруженные противоречия в вопросе оценки термического сопротивления пленки конденсата на поверхности воздухоохладителя. На основании выполненного анализа сформулированы задачи исследований диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований механических осушителей воздуха. Экспериментальные исследования посвящены изучению процессов теплопереноса в поверхностном воздухоохладителе в условиях интенсивного влаговыпадения.

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутую аэродинамическую трубу состоящую из узла подготовки парогазового потока, рабочего участка, охлаждающего контура и контрольно-измерительных и регулирующих приборов.

Исследования проведены с воздухом при начальном влагосодержании от 0.067 до 0.107 кг/кг в интервале температур  $49.8 \pm 107.2$  °С. Диапазон перечисленных параметров обусловлен необходимостью создания рабочего интервала коэффициентов влаговыпадения -  $\xi = 1.4 \pm 5.6$ . Расход воздуха во всех режимах поддерживался неизменным на уровне принятого среднего значения -  $12.8 \cdot 10^{-3}$  кг/с, что соответствовало средней массовой скорости воздуха в живом сечении рабочего участка  $\sim 4.1$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Исследования подтвердили выводы о значительной интенсификации процесса теплообмена при наличии массообменных процессов.

На рис. 1 представлена опытная зависимость условного коэффициента теплоотдачи от значения коэффициента влаговыпадения. Несмотря на значительные различия по количеству сконденсированной влаги (2÷4 раза), влияние термического сопротивления пленки конденсата на значение приведенного коэффициента теплоотдачи в опытах не обнаружено. Очевидно,

на поверхности теплообмена при любой интенсивности массообменных процессов удерживалась пленка конденсата примерно равной толщины, о чем свидетельствовали опытные значения, определенные косвенным путем.

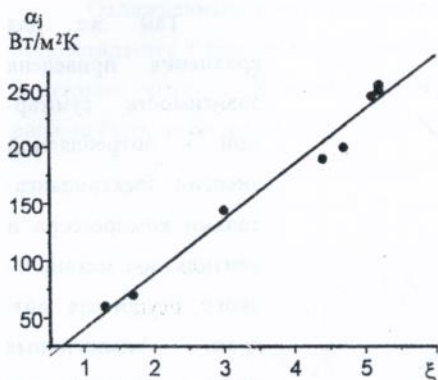


Рис. 1. Зависимость  $\alpha_j = f(\xi)$  ЭВМ. Апробация математической модели осуществлялась на режимах работы механического осушителя, исследованных А.А.Гоголиным. Хорошая сходимость сравниваемых результатов свидетельствовала о надежности предложенной модели расчета.

Характеристикой экономичности механического осушителя при принятой постоянной осушающей способности  $G_w=1$  кг/час был выбран условный холодильный коэффициент.

$$\epsilon_o = \frac{Q_o \frac{\xi-1}{\xi}}{N_e} = \epsilon_c \frac{\xi-1}{\xi}.$$

На основании выполненных расчетов получены зависимости потребной холодопроизводительности установки, суммарного энергопотребления двигателями компрессора и вентилятора для климатических условий засушливых и безводных районов земного шара. Анализ полученных данных показал, что определяющим фактором в расходе энергии на работу механического осушителя воздуха является температура наружного воздуха и степень ее влияния тем больше, чем ниже влагосодержание осушаемого воздуха.

Для всех рассмотренных режимов ( $t_{н.в.}=15+35$  °С,  $d_{н.в.}=(4.5+10.5) \cdot 10^{-3}$  кг/кг), наиболее полная оценка эффективности механического осушителя

Для проведения многовариантных расчетов энергетических показателей механических осушителей воздуха, работающих в широком диапазоне изменения параметров наружного воздуха (температуры и влагосодержания), была разработана блок-схема расчета и составлена программа, реализованная на

получена в виде зависимостей условного холодильного коэффициента от параметров осушаемого воздуха. На рис. 2 представлена отмеченная зависимость для фиксированного влагосодержания наружного воздуха  $d_{н.в.} = 5.2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг в интервале изменения его температуры  $t_{н.в.} = 15 \div 35$  °С.

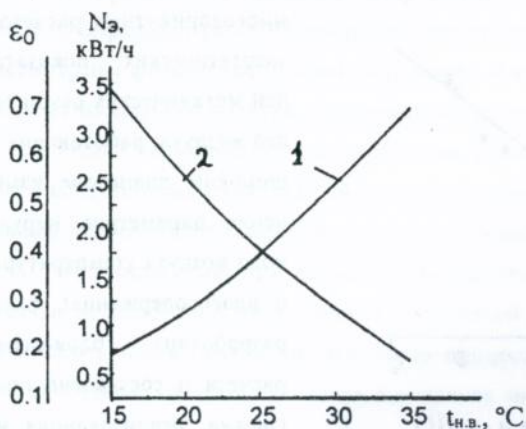


Рис. 2. Зависимость суммарной потребляемой энергии ( $N_{э}$ ) электродвигателями механического осушителя воздуха (1) и условного холодильного коэффициента ( $\epsilon_0$ ) (2) от температуры наружного воздуха при фиксированном его влагосодержании  $d_{н.в.} = 5.2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг

Там же для сравнения приведена зависимость суммарной потребляемой энергии электродвигателями компрессора и вентилятора механического осушителя воздуха. Аналогичные данные получены для широкого диапазона температурно-влажностных условий наружного воздуха.

В третьей главе рассмотрены альтернативные схемы установок получения воды из влаги атмосферного воздуха для принятых проектных параметров. В качестве таковых проанализированы:

– установка получения воды с помощью водного раствора LiCl;

– абсорбционный гелиохолодильник периодического действия.

На основании анализа частных процессов (осушение воздуха, реконцентрации водного раствора LiCl, конденсации выделенной влаги в процессе реконцентрации раствора, охлаждения поглотителя влаги перед последующим его использованием в процессе осушения воздуха) предложен наиболее экономичный вариант установки с узлом выпаривания водного раствора LiCl.

На рис. 3 приведена схема установки, в которой конденсацию паров воды осуществляют при высокой температуре насыщения. Принцип работы установки в режиме охлаждения раствора следующий. Из кипяточного ба-

на основании анализа частных процессов (осушение воздуха, реконцентрации водного раствора LiCl, конденсации выделенной влаги в процессе реконцентрации раствора, охлаждения поглотителя влаги перед последующим его использованием в процессе осушения воздуха) предложен наиболее экономичный вариант установки с узлом выпаривания водного раствора LiCl.

На рис. 3 приведена схема установки, в которой конденсацию паров воды осуществляют при высокой температуре насыщения. Принцип работы установки в режиме охлаждения раствора следующий. Из кипяточного ба-

ка (7) водный раствор соли при атмосферном давлении и его температуре кипения  $\sim 140^\circ\text{C}$  с помощью насоса (6) подается в воздушный теплообменник (4) обдуваемый вентилятором (5).

Охлажденный раствор сливается в бак (7). Охлаждение раствора осуществляется в ночное время при наиболее низкой суточной температуре наружного воздуха. Конечная температура раствора после охлаждения должна быть не более  $30^\circ\text{C}$ .

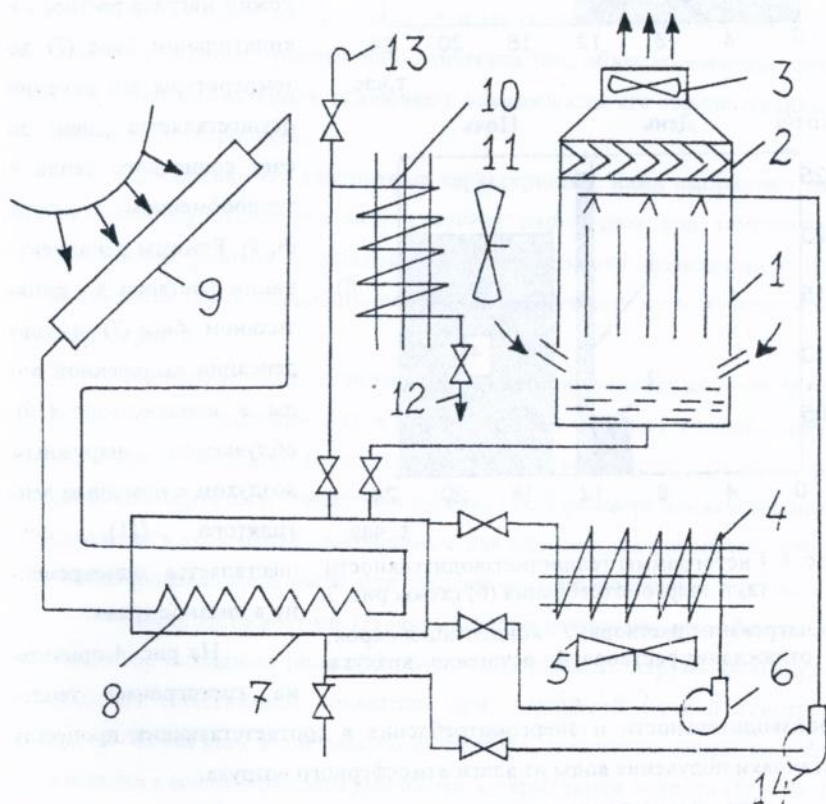


Рис. 3. Принципиальная схема установки

- 1 - теплообменный блок (абсорбер); 2 - сепаратор; 3, 5, 11 - вентилятор;  
 4 - теплообменник-охладитель; 6, 14 - насос; 7 - кипящий бак;  
 8 - теплообменник нагреватель; 9 - солнечный коллектор; 10 - конденсатор;  
 12 - трубопровод слива воды; 13 - трубопровод выпуска паровоздушной смеси

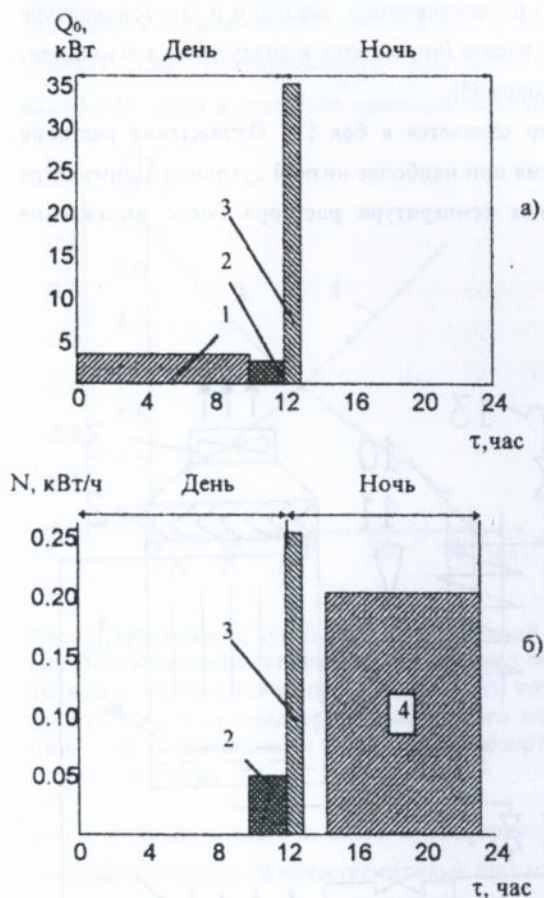


Рис. 4. Гистограммы теплопроизводительности (а) и энергопотребления (б) схемы рис. 3

1 - нагревание раствора; 2 - конденсация паров; 3 - охлаждение раствора; 4 - осушение воздуха

В режиме осушения воздуха (в ночное время водный раствор соли с помощью насоса (14) подается в блок теплообмена (1), где поглощает влагу из воздуха продуваемого с помощью вентилятора (3). Режим нагрева раствора в кипятельном баке (7) до температуры его кипения осуществляется днем, за счет солнечного тепла в теплообменном контуре (8, 9). Режимы реконцентрации раствора в кипятельном баке (7) и конденсации выпаренной воды в конденсаторе (10), обдуваемом наружным воздухом с помощью вентилятора (11), осуществляется одновременно в дневное время.

На рис. 4 приведена гистограмма тепло-

производительности и энергопотребления в соответствующих процессах установки получения воды из влаги атмосферного воздуха.

Для рассматриваемого режима, при заданной производительности по воде  $G_w = 10$  кг/сут. энергопотребление установки составило  $\approx 0.3$  кВт/кг. воды. Масса заправляемого в установку раствора - 360 кг. Потребная поверхность солнечных коллекторов составила  $\sim 7$  м<sup>2</sup>.

С энергетической точки зрения, наиболее экономичным устройством для получения воды из влаги атмосферного воздуха является безнасосный абсорбционный гелиохолодильник периодического действия. Его преимущество состоит в совпадении принципа действия с периодами использования низкопотенциального тепла:

- солнечной энергии для генерации пара хладагента из раствора в дневное время;
- самой низкой суточной температуры наружного воздуха для абсорбции пара хладагента раствором в ночное время.

В этих условиях энергопотребление гелиохолодильника равно нулю. Однако, для рассмотренных климатических зон, объемно-массовые показатели гелиохолодильника исключают возможность его использования как мобильного устройства.

Для оценки его габаритных характеристик, нами выполнены расчеты основных проектно-конструкторских параметров для температурно-влажностных условий рассматриваемых в настоящем исследовании. Принципиальная схема абсорбционного водоаммиачного холодильника приведена на рис. 5.

На первом этапе солнечный коллектор выполняет роль генератора. За счет тепла солнечной энергии при открытом вентиле (2) водоаммиачный пар выходит из коллектора (1) и поступает в воздушный конденсатор (3), где конденсируется и сливается в ресивер (4). В ресивере должен накопиться хладагент в количестве необходимом для обеспечения расчетной суточной холодопроизводительности при заданном температурном режиме.

После этого ventиль (2) закрывается и начинается второй этап. Здесь коллектор выполняет роль абсорбера, охлаждаемого наружным воздухом в условиях естественной конвекции при принятой ночной температуре  $t_{д.в.} = 20^\circ\text{C}$ . На этом этапе работы коллектора, стеклянное покрытие и теплоизоляция с его поверхности удаляются. Открываются вентили (6) и (8). Сначала обедненный водоаммиачный раствор в коллекторе охлаждается. Затем начинается процесс абсорбции паров аммиака, образующихся в испарителе за счет тепломассообмена с наружным воздухом. Длительность периода работы испарителя принята равной 10 часам установившегося рабочего режима.

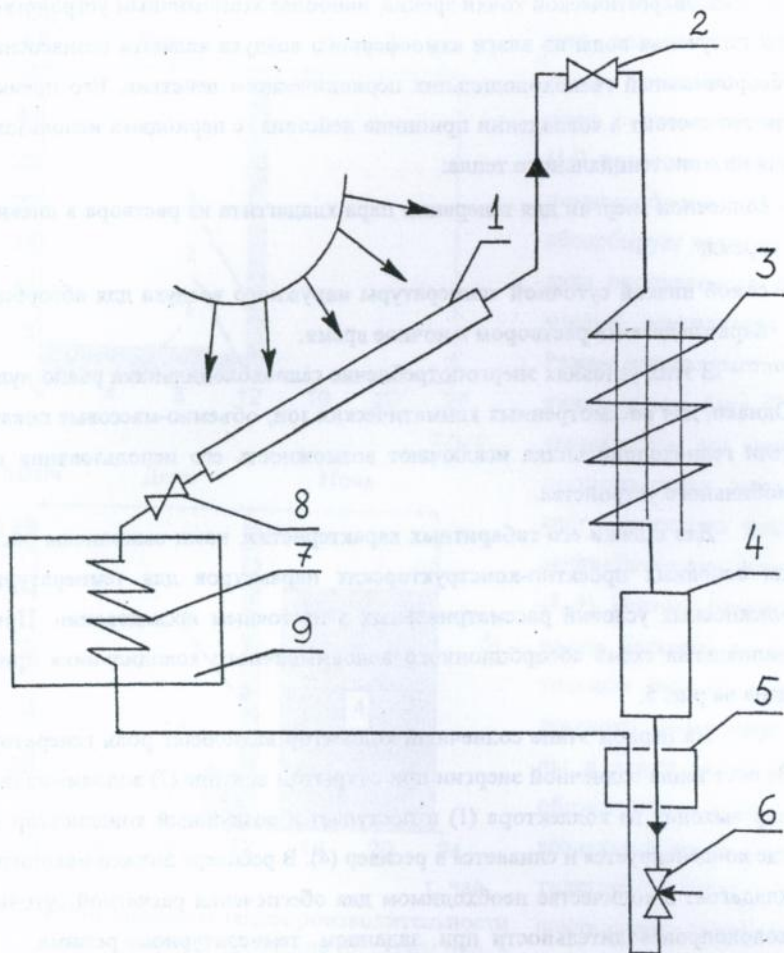


Рис. 5. Принципиальная схема гелиохолодильника периодического действия

1 - солнечный коллектор типа лист-труба; 2, 8 - вентиль; 3 - воздушный конденсатор; 4 - рессивер; 5 - регенеративный теплообменник; 6 - дроссельный вентиль; 7 - испаритель; 9 - поддон для сбора воды

На основании параметров в узловых точках цикла, определенных по диаграмме  $\xi-i$ , для водоаммиачного раствора, с учетом исходных данных определены тепловые потоки в аппаратах абсорбционного гелиохолодильника. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Наименование аппарата	Тепловой поток кВт	Плотность теплового потока Вт/м <sup>2</sup>	Потребная площадь поверхности аппарата м <sup>2</sup>
Испаритель	5.6	125	45
Конденсатор	7.9	80	100
Генератор	22.6	500	45.2
Абсорбер	20.4	200	102

Для получения воды из влаги атмосферного воздуха, в количестве 10 кг/сут., необходимо накопить в ресивере 220 кг хладагента. При этом заправка системы водоаммиачным раствором составит 1390 кг.

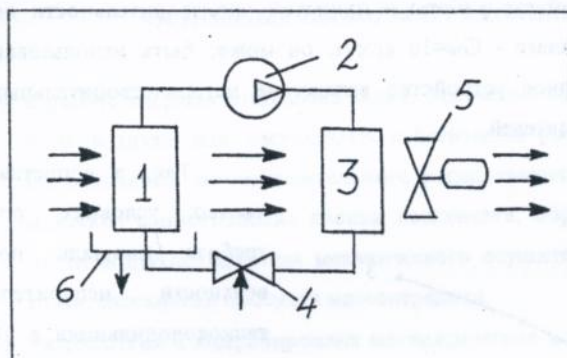


Рис. 6. Принципиальная схема механического осушителя воздуха

1 - воздухоохладитель; 2 - компрессор; 3 - конденсатор воздушного охлаждения; 4 - вентилятор; 5 - вентилятор; 6 - поддон для сбора воды

В четвертой главе приведено сопоставление рассмотренных установок.

В качестве базового варианта сравнения был принят механический осушитель воздуха, работающий по схеме, представленной на рис. 6.

Базовая модель механического осушителя

воздуха для условий ( $t_{н.в.} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_{н.в.} = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/кг}$ ) имеет следующие параметры:

холодопроизводительность компрессора

при  $t_k = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = -3.5 \text{ }^\circ\text{C}$

- 9.3 кВт;

потребляемая мощность двигателя компрессора

- 3.1 кВт;

потребляемая мощность двигателя вентилятора

- 0.4 кВт;

площадь поверхности воздухоохладителя

- 10 м<sup>2</sup>;

площадь поверхности конденсатора

- 36 м<sup>2</sup>.

На рис. 7 приведены данные производительности базовой модели механического осушителя по сконденсированной атмосферной влаге ( $G_w$ ) при изменении температуры и влагосодержания наружного воздуха.

Вариантные расчеты частных процессов установки получения воды с помощью водного раствора соли LiCl, принципиальная схема которой приведена на рис. 3, показали, что ее энергопотребление составило  $\sim 0.3$  кВт/кг. воды, что примерно в 4 раза ниже, по сравнению с механическим осушителем воздуха в сопоставимых условиях. Наиболее существенным конструктивным недостатком рассмотренной установки, исключающим возможность отнести ее к классу мобильных устройств, является наличие большой теплообменной поверхности солнечных коллекторов в системе нагрева раствора LiCl до температуры его кипения. Анализ работы абсорбционного гелиохолодильника периодического действия показал, что для проектных условий его работы и принятой производительности по сконцентрированной влаге -  $G_w=10$  кг/сут. он может быть использован только как стационарное устройство вследствие неудовлетворительных объемно-массовых показателей.

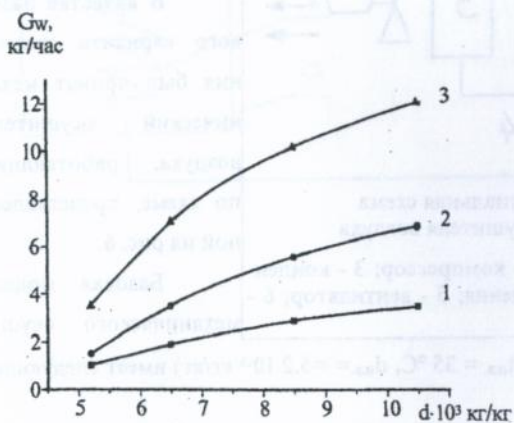


Рис. 7. Зависимость производительности базовой модели механического осушителя по сконденсированной влаге ( $G_w$ ) при изменении температуры и влагосодержания наружного воздуха

1.  $t_{н.в.} = 35^\circ\text{C}$ ; 2.  $t_{н.в.} = 25^\circ\text{C}$ ; 3.  $t_{н.в.} = 15^\circ\text{C}$

можно снизить за счет использования гелиохолодильника в благоприятных температурно-влажностных условиях эксплуатации. Так, изменение влаговыпадения наружного воздуха от  $5.2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг до  $10.5 \cdot 10^{-3}$  кг/кг при прочих равных условиях, позволит снизить массовые характеристики гелиохоло-

Так, в сопоставляемых условиях, потребная площадь поверхности испарителя гелиохолодильника в 10 раз превышает площадь поверхности механического осушителя воздуха.

Самым громоздким и массивным аппаратом гелиохолодильника является солнечный коллектор, выполняющий роль генератора абсорбера. Его объемно-массовые характеристики

дильника в 36 раз. Отмеченные условия позволят также снизить энергопотребление механического осушителя воздуха с 1.5 кВт/ч при  $d_{н.в.}=5.2 \cdot 10^{-3}$  кг/кг до 0.41 кВт/ч при  $d_{н.в.}=10.5 \cdot 10^{-3}$  кг/кг при температуре наружного воздуха 20 °С.

При повышении температуры наружного воздуха до 35 °С осуществление процессов получения воды из влаги атмосферного воздуха, на установках использующих процессы абсорбции, весьма проблематично.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В работе впервые поставлена задача получения воды из влаги атмосферного воздуха для засушливых и безводных регионов земного шара.
2. На основании экспериментального исследования установлено, что термическое сопротивление пленки конденсата, образующейся на поверхности воздухоохладителя механического осушителя воздуха, не зависит от интенсивности процесса массопередачи.
3. Разработана и апробирована математическая модель по оценке энергетической эффективности механического осушителя воздуха. Полученная модель может быть использована при проектировании механических осушителей воздуха для любых эксплуатационных условий.
4. Определены условия и факторы, направленные на снижение энергоемкости и объемно-массовых показателей систем получения воды из атмосферного воздуха.
5. Установлено, что для климатических условий засушливых и пустынных районов Земли, установки с использованием принципа абсорбции не могут быть отнесены к классу мобильных передвижных устройств.

#### Публикации по материалам, изложенным в диссертации:

1. Experimental investigation of heat exchange process under intensive moisture condition / V.P.Chepurnenko, N.I.Gogol, A.E.Lagutin, H.M.Moinuddin - Proceeding of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue - 1996, V. 1, p. 211-216.

2. Mathematical Modelling of heat-and-mass exchange process in Vegetable products cold Storage / V.K.Kirillov, Al-Akhras Gassan, H.M.Moinuddin - Proceeding of the 1997 International Conf. "Heat Transfer issues in "NATURAL" Refrigerants" at Maryland University - 1997.

### SUMMARY

Moinuddin Hasan Mohammad. The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences of speciality 05.04.03 - Machines apparatus refrigerating, cryogenic technology and systems of conditioning.

Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa. 1997.

Results of theoretical and experimental research of a mechanical air drier and other alternative devices to obtain water from atmospheric air moisture in dry areas of the earth are given. The criteria for the assessment of said devices were mobility and power consumption with an adopted water production capacity of 10 kg per day.

### АНОТАЦІЯ

Мойнуддін Хасан Мохаммад. Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.04.03 - Машини та апарати холодильної та криогенної техніки, системи кондиціонування.

Одеська Державна Академія холоду. Одеса. 1997.

Наведені результати теоретичних та експериментальних дослідів механічного осушителя повітря та інших альтернативних приладів, призначених для отримання води із вологи атмосферного повітря у засушливих районах земної кулі. Критерієм оцінки розглянутих приладів були мобільність та енергоспоживання при установленій продуктивності по воді 10 кг/добу.

### Условные обозначения:

- |   |  |
|---|--|
| $\xi$ - коэффициент влаговывадения;               | $\varepsilon_e$ - холодильный коэффициент; |
| $Q_d$ - холодопроизводительность;                 | $N_e$ - электрическая мощность;            |
| $\zeta$ - концентрация раствора;                  | $i$ - энтальпия;                           |
| $\alpha_j$ - приведенный коэффициент теплоотдачи. |  |

Сдано в набор 20.05.97. Подписано в печать 21.05.97.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Объем 1 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 279.

Отпечатано в типографии НПФ "Астропринт",  
Одесса, 270100, ул. Преображенская, 24.

Тел.: 26-98-82, 68-77-33.

80





AB 38.160