

УДК 621.564; 621.56/.59

Вакуумно-испарительные холодильные системы

Д-р техн. наук И. М. КАЛНИНЬ, *д-р техн. наук* Б. Т. МАРИНЮК,
канд. техн. наук К. С. КРЫСАНОВ

Московский государственный машиностроительный университет
107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38

The paper describes on investigation of the effectiveness of the water as a refrigerant. Some historical aspects of this matter were observed.

An engineering and environmental advantage of such systems was discussed. Some historical aspects of this phenomenon were suggested. The basic schemes of water cooling and ice machining installations with water as a refrigerant are given and described.

Keywords: Roots-type vacuum-pump; refrigerants; water cooling installations, energy consumption; binary ice, ice water.

Ключевые слова: Рутс — вакуумный насос, холодильный агент, охлаждение воды, бинарный лед, ледяная вода.

Получение искусственного холода с использованием пароконденсационных машин относится к концу XVII в. и связано с именем Гаврилы Черепанова и его сотрудника и помощника из Германии Франца Шварцдорфа. В качестве рабочего вещества, в созданной изобретателями холодильной машине, использовали аммиак, который наряду с такими веществами как CO_2 , углеводороды и вода является природным соединением и не наносит вреда окружающей среде.

Тем не менее, на достаточно продолжительный промежуток времени использование природных рабочих веществ типа CO_2 , углеводородов и воды для генерации холода было забыто, это объясняется господством в холодильной технике только аммиака, а с 30-х годов прошлого века — фреонов. Мощным импульсом для недавно возникшего интереса промышленности к использованию водного пара в качестве холодильного агента, стала разработка строгих правил и норм использования синтетических хладагентов. Заметную лепту в решении данной проблемы следует отнести периодически проводимой научной конференции по природным рабочим веществам им. Густава Лоренцена, где происходит осмысление и обобщение информации по данной проблеме, поступающей из разных стран — членов МИХ.

Использование воды в холодильных машин имеет давнюю историю, и по праву вода может считаться одним из первых холодильных агентов. Впервые водный пар для захлаживания был использован в 1755 г., когда В. Каллен замораживал воду под стеклянной колбой, откачивая из нее воздух и пары воды [1]. Однако, только в 1874 г. благодаря французскому инженеру Эдмунду Карре лабораторный опыт получил дальнейшее развитие. Установка имела ручной привод для создания предварительного разряжения и бак концентрированной серной кислоты для поглощения водяных паров (рис. 1) [2]. Данная установка позволяла доводить воду до замерзания. Немецкий инженер Франц Виндхаузен (1829–1904), был пионером в области механических принципов производства холода, его установки в 1888 г. работали на угле и потребляли до 6 кг угля на каждые 100 кг произведенного льда, которые использовали для пивоварен и ресторанов Германии, в качестве холодильного агента для ле-

догенерации использовался водяной пар (рис. 2) [2].

Первый центробежный компрессор для водного пара был создан в городе Лебланк США в 1912 г., а первый осевой компрессор для откачки пара был использован в 1934 г. для кондиционирования воздуха в универсальном магазине Нью-Йорка.

Вода является экологически чистым веществом, которое не загрязняет окружающую среду, не создает эффекта глобального потепления среды (табл. 1). Однако вода как холодильный агент имеет ряд особенностей, что позволяет говорить об установках, в которых она используется, как об отдельном классе холодильных машин.

Вакуумные холодильные машины можно удачно применить не только для охлаждения воды и производства льда в различных модификациях. Развивается направление применения вакуумных холодильных машин в качестве тепловых насосов. Такой опыт требует дальнейшего изучения и распространения [3, 4].

Области применения систем, использующих воду в качестве холодильного агента, можно условно разделить на три группы: системы для охлаждения воды, замораживания воды и термотрансформации (рис. 3). Все эти группы объединяются едиными процессами тепло-массобмена и связанными с фазовыми переходами воды в условиях вакуума.

Эти процессы могут осуществляться дискретно охлаждение (охлаждение или замораживание порция воды одновременно) и непрерывно. Системы для замораживания воды, различаются по характеру полученной твердой фазы (массив льда, слоеный лед, снег, бинарный лед).

При использовании воды в качестве холодильного агента можно рассчитывать на максимальное упрощение технологической схемы холодильной установки, поскольку вода может быть как хладагентом, так и хладоносителем. Это значительно уменьшает стоимость и сложность систем охлаждения. Однако вода как холодильный агент имеет очень низкий уровень рабочих давлений, в результате система должна пропускать большие объемные потоки водяного пара и отношения давлений (рис. 4, табл. 2).

Таблица 1

Таблица 2

Сравнение характеристик холодильных агентов

Хладагент	GWP	ODP	Группа токсичности
R12	4600	1,0	A1
R22	1700	0,034	A1
R134a	1300	0	A1
R123	120	0,012	A1
Вода	<1	0	A1
Аммиак	0	0	B2
CO ₂	1	0	A1

Параметры идеальных циклов на основе воды и R22 (для сравнения водяной цикл замкнут)

Параметр	Вода	R22
Температура кипения, °C	7	7
Температура конденсации, °C	35	35
Давление всасывания, кПа	0,96	600
Давление нагнетания, кПа	5,6	1350
Степень сжатия	5,8	2,25
Разность давлений, кПа	4,64	750
Удельный объем на всасывании в компрессор, м ³ /кг	131	0,37
Теоретический холодильный коэффициент	8,91	8,48

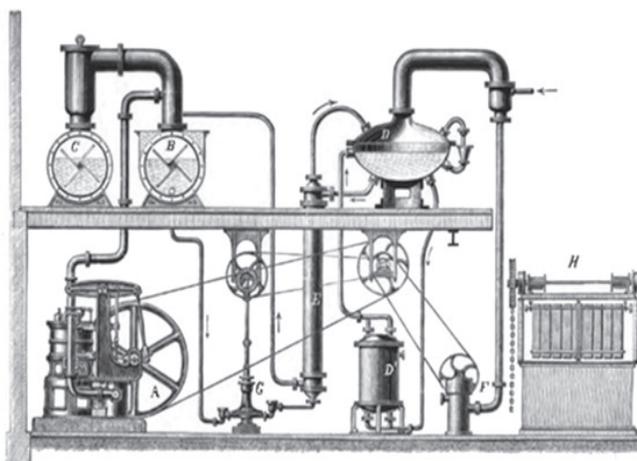


Рис. 1. Установка Эдмонда Карре 1874 г.

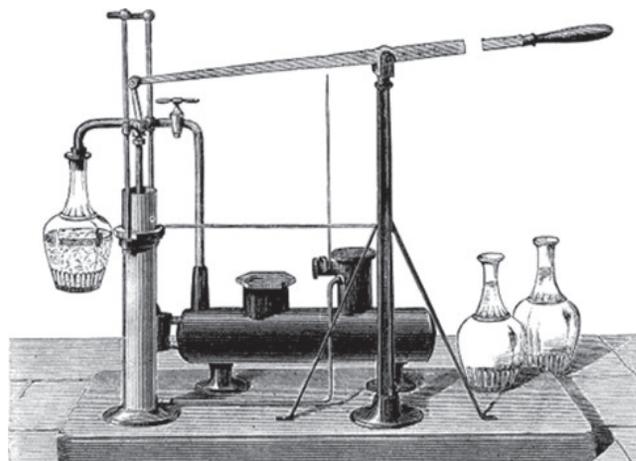


Рис. 2. Вакуумный льдогенератор Франца Виндхаусена 1888 г.



Рис. 3. Классификация вакуумных технологий получения низких температур

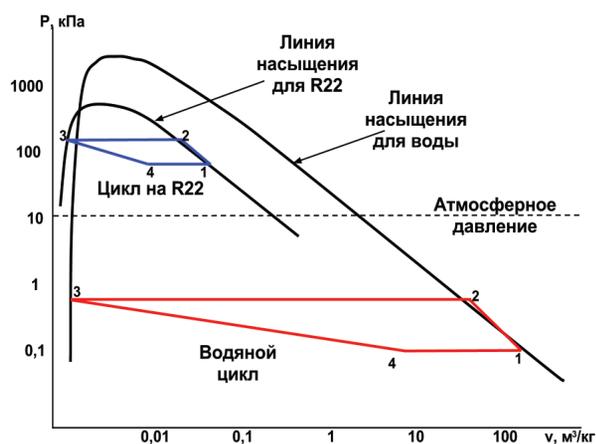


Рис. 4. Сравнение идеальных циклов на основе воды и R22 (для сравнения водяной цикл замкнут)

Основной цикл работы машин работающих на воде фактически идентичен парокompрессионному холодильному циклу с традиционными холодильными агентами, за исключением того, что в связи с доступностью и относительной дешевизной воды как холодильного агента, возможно ее использование в разомкнутом цикле, что существенно упрощает схему установки.

В силу специфических свойств воды в установках не может быть использован существующий парк компрессорного оборудования, поэтому в для компримирования водяного пара выбирают высокоскоростные машины, способные работать в диапазоне давлений 5–50 мм рт.ст.

На 22-м Международном конгрессе по холодильной технике в 2007 г. (Пекин) профессором Копенгагенского технического университета Йохимом Дж. Паулом был представлен доклад по применению воды в качестве холодильного агента [5], где автор убедительно показал преимущества хладагента-воды в крупных установках для систем кондиционирования воздуха. По данным доклада, теоретический холодильный коэффициент разомкнутого цикла охлаждения на воде достигал 8,9 ед.

В настоящее время в области использования воды как холодильного агента, в мире, определенных успехов достигли компании — IDE (Израиль), DTI (Дания).

IDE (IDE Technologies Ltd.) — изначально компания занимающаяся опреснением воды в том числе и вакуумно-испарительным способом, однако они активно используют свои технологии и для охлаждения. IDE в настоящее время один из лидеров в создании центробежных компрессоров для водяного пара. IDE разработали две линии установок ECO-VIM и ECO-CHILLER (торговые марки IDE). ECO-VIM вакуумно — испарительные ледогенераторы (рис. 5), ECO-CHILLER вакуумно — испарительные машины для охлаждения воды [6]. На основе ECO-VIM, IDE производит установки All Weather Snowmaker (рис. 6), применяемые для генерации искусственного снега. Специалистами НПФ «Химхолод-сервис» выпущена система, обеспечивающая на базе вакуумного блока VIM IDE производство снега для двух объектов зимней олимпиады «Сочи 2014».

DTI работает над вакуумно-испарительными установками, использующими воду как холодильный агент



Рис. 5. Комплекс вакуумно — испарительных ледогенераторов ECO-VIM



Рис. 6. Вакуумно-испарительные установки IDE All Weather Snowmaker



Рис. 7. Экспериментальный вакуумно-испарительный стенд, находящийся в лаборатории кафедры Техники низких температур им. П. Л. Капицы

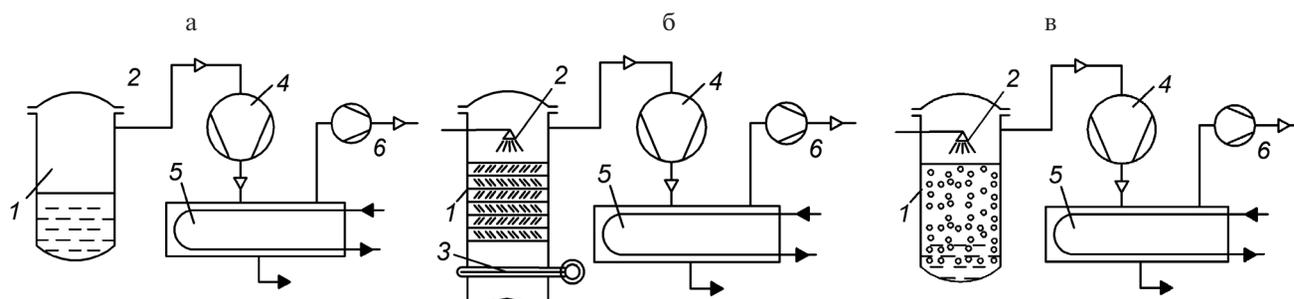


Рис. 8. Вакуумные холодильные машины:

а — вакуумный водоохладитель; б — вакуумный генератор водного льда с послойным намораживанием;

в — вакуумный генератор бинарного льда.

Условные обозначения:

1 (а) — испаритель-водоохладитель. 1 (б) — гермокамера; 1 (в) — гермокамера с композицией из воды и части льда;

2 — форсунка для распыления воды; 3 — дисковый затвор; 4 — вакуумный насос-компрессор; 5 — конденсатор;

6 — вспомогательный вакуумный насос

для холодильных машин и тепловых насосов. Одна из крупных водяных холодильных установок, созданная фирмой DTI, находящейся на заводе LEGO. Эта установка создана совместно с Датским Энергетическим Агентством.

В германии на фирме INTEGRAL Energietechnik GmbH (Германия) уже несколько лет упорно работают над созданием вакуумно-испарительных холодильных машин на основе осевых компрессоров.

Известны проекты, по использованию воды в качестве холодильного агента, в России, Канаде, Японии, Норвегии, Нидерландах, Соединенных Штатах Америки, Швеции и других странах мира.

На сегодняшний день, наибольший опыт имеется по применению воды в крупных холодильных машинах. Гораздо меньше имеется информации по использованию воды в небольших холодильных машинах.

В нашей стране начало исследований по данной проблеме относится ко второй половине 80-х годов прошлого века, когда на кафедре холодильной техники МГМУ (бывший МИХМ, МГУИЭ) были созданы опытный стенд по вакуумно-испарительному охлаждению жидкостей и были получены патенты РФ на способ получения искусственного холода и устройство для его осуществления [7, 8].

В настоящее время в низкотемпературной лаборатории кафедры техники низких температур им. П. Л. Капицы Московского государственного машиностроительного университета проводятся систематические исследования вакуумных холодильных машин на базе бесконтактных насос-компрессоров (рис. 7). Схемы установок показаны на рис. 8. Отличительной особенностью процесса компремирования подобных машин является отсутствие сжатия паров воды в проточной части, что исключает конденсацию пара в проточной части машины, процесс сжатия происходит в выхлопном патрубке. В отличие от насос-компрессоров с внутренним сжатием (поршневых, винтовых, многоступенчатых вращательных, спиральных) в двухсторонних насос-компрессорах степень сжатия может достигать 10 и 12 ед. с приемлемыми значениями коэффициентов подачи.

На рис. 8, а показана схема вакуумного водоохладителя периодического действия. Процесс охлаждения при этом инициируется за счет понижения давления

упругости паров над зеркалом воды, массообменные процессы проходящие при этом можно разделить на две стадии. Первая стадия — дегазация охлаждаемой массы воды, которая сопровождается бурным вскипанием верхней части слоя воды. Вторая стадия характеризуется пузырьковым кипением, при этом темп понижения давления существенно ниже.

Как показали результаты наших испытаний, вакуумно-испарительной холодильной машины, при работе с водяным конденсатором расход энергии на охлаждение воды до околонулевых температур в среднем на 12–16% ниже, чем в пароконпресссионных холодильных машинах на хладагонах [9].

Конструктивно вакуумный льдогенератор для послойного намораживания водяного льда (рис. 8, б) отличается тем что в объеме цилиндрической гермокамеры 1 (б) под крышечкой размещается форсунка 2 для мелкодисперсного распыления воды, а нижняя часть аппарата снабжается вакуумным дисковым затвором который используется для эвакуации цилиндрического массива льда после окончания намораживания 3.

Фактически послойное намораживание льда является третьей стадией процесса охлаждения воды, в течение которой происходит собственно фазовый переход ее в лед и переохлаждение верхней части ледяной линзы за счет сублимации водяного пара, что обеспечивает рост толщины слоя льда в толщу воды. Заметим, что получаемый при вакуумной откачке водяной лед имеет температуру от 0 до $-0,5$ °С, что является оптимальным режимом получения льда с точки зрения расхода энергии. Как показали исследования, расход энергии при этом снижается по сравнению с традиционными льдогенераторами различных типов, где намораживание льда ведется при температуре на стенке от -9 до -15 °С. Удаление водяного льда с поверхности при этом осуществляется механическим воздействием на него (скребки, шнеки) или оттаиванием льдоформы, что требует дополнительного расхода энергии.

В последние годы возник интерес к бинарному льду использование которого в системах спец. кондиционирования, охлаждения молока или транспортировки свежей рыбы в ледяной воде дает заметные преимущества по сравнению с обработкой холодной водой с температурой от 3 до 5 °С не содержащей льда.



Рис. 9. Пилотный образец установки для производства бинарного льда находящийся в лаборатории кафедры Техники низких температур им. П. Л. Капицы

Технология получения водоледяной суспензии связана с вакуумным воздействием на мелкодисперсные капли воды, распыляемые в вакуумируемый объем посредством форсунки (рис. 8, б). Физически замораживание частиц воды в вакуумируемой полости гермокамеры происходит как и в предыдущем случае за счет сублимационного процесса с поверхности замороженных частиц воды. Образующаяся масса частиц льда далее смешивается с ледяной водой. Расчет времени охлаждения капли воды диаметром d можно найти по уравнению, представленному в источнике [10].

Создание машин для производства бинарного льда представляется наиболее перспективным направлением для условий России так как шуга имеет многоцелевое применение как хладоноситель с повышенными холодоаккумуляционными свойствами. В настоящее время наш

коллектив занят созданием пилотного образца такой установки (рис. 9).

Использование воды как холодильного агента является перспективным направлением развития холодильной техники, в настоящее время оно находится в стадии развития. Учитывая потребность страны в экологически чистых машинах отвечающим международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности, обоснована необходимость дальнейших исследований в данной области.

Список литературы

1. D'Orsi N. C., Le Drew B. A., Tsukasa Y., Wight S. E. The efficiency limits of water vapor compressors. Concepts. ETI, Contract: 605–10010.
2. Simo'n Reif-Acherman «The early ice making systems in the nineteenth century», School of Chemical Engineering, Universidad del Valle, A. A. 25360 Unicentro, Cali, Colombia.
3. Маринюк Б. Т., Крысанов К. С. Высокотемпературные режимы вакуумного охлаждения воды // Холодильный бизнес. 2005. №7.
4. Chamoun M., Rullierer, Habershill P, Berail J. F. Water Vapour as refrigerant for a new Temperature Heat Pump. По материалам доклада на 23 Международном конгрессе по холоду в Праге 21–26 августа 2011 г. // Холодильная техника. 2012. №12.
5. J. D. Paul State of the art For Cooling with «Water as Refrigerant» (R718) International Congress of Refrigeration 2007, Beijing.
6. Koren A., Ophir A. Water Vapor Technology: Application to Commercially Operating Equipment // Applications for Natural Refrigerants, IIR, Aarhus, 1996.
7. Патент №2178128 от 02.02.2000 г. Способ получения холода Б. И. №1 от 10.01.2002 г. Автор Б. Т. Маринюк.
8. Патент №2215247 от 27.10.2003 г. Вакуумная установка для охлаждения жидкости. Б. И. №30 от 27.10.2003 г. Автор Б. Т. Маринюк.
9. Marinyuk B. T., Krysanov K. S., Ermolaev A. E. Vacuum-evaporative refrigeration and ice generation installation./22nd international congress of refrigeration, Refrigeration creates the future. August 21–26, 2007, Beijing, P. R. China. ICR07-B2–60.
10. Маринюк Б. Т. Теплообменные аппараты ТНТ. Конструктивные схемы и расчет. — М: Энергоатомиздат, 2009.