

УДК 621.56/.58

Двухкаскадная холодильная машина для получения «жидкого льда» с вакуумно-испарительной нижней ступенью на воде

Канд. техн. наук **М.А. КОЛОСОВ**,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, kolosov@himholod.ru
И.М. АРТЕМОВ, ООО «НПФ «ХИМХОЛОДСЕРВИС»,
artemov@himholod.ru

Описана инновационная каскадная холодильная установка с вакуумно-испарительной нижней ступенью на воде, которая может служить примером нового технического решения, сочетающего высокие показатели эффективности с отказом от использования озоноразрушающих и парниковых рабочих веществ. Компанией «НПФ «ХИМХОЛОДСЕРВИС» на базе такой холодильной установки разработана концепция снегогенератора для оснеживания объектов зимней олимпиады «Сочи-2014».

Нижняя ступень исполнена в виде единого вакуумного блока, включающего уникальный турбокомпрессор, концевой теплообменник-конденсатор и вакуумную камеру с мешалкой, позволяющей получать «жидкий лед». Это эффективное и эффективное решение дает возможность создать крупнотоннажные холодильные установки с превосходными технико-экономическими показателями.

Ключевые слова: каскадный пароконденсационный цикл, вакуумный блок, вода как хладагент, «жидкий лед», экологическая безопасность.

TWO-CASCADE REFRIGERATING MACHINE WITH WATER VACUUM-EVAPORATIVE LOWER STAGE FOR «LIQUID ICE» PRODUCTION

M.A. Kolosov, Ph.D., Bauman Moscow State Technical University, kolosov@himholod.ru

I.M. Artemov, «NPF «KHIMKHOLDSERVIS» Ltd, artemov@himholod.ru

Innovative cascade refrigerating machine with water vacuum-evaporative lower stage is described. It may be an example for a new technical solution combining high indices of efficiency and refusal of using ozone depleting and greenhouse gases. On the basis of such a refrigerating plant the «NPF «KHIMKHOLDSERVIS» elaborated a concept of snow-generator for making snow in the objects of the Winter Olympics «Sochi-2014».

A lower stage is made in the form of a united vacuum block including a unique turbo-compressor, a heat exchanger-condenser and a vacuum chamber with an agitator that provides «liquid ice» production. This effective and spectacular solution allows creating large capacity refrigerating installations with excellent technical and economic characteristics.

Key words: cascade vapor-compression cycle, vacuum block, water as a refrigerant, «liquid ice», ecological safety.

Вода, которую еще в конце XVIII в. Вильям Гулен (William Gullen) использовал как рабочее тело в лабораторной холодильной машине, сегодня в этом качестве находит весьма ограниченное применение (например, в парожеткаторных или абсорбционных холодильных машинах). Причины этого хорошо известны специалистам: высокая температура тройной точки (0,01 °С) и низкие рабочие давления кипения создают проблемы при конструировании компрессоров и ограничивают область эффективного применения воды в качестве хладагента. Однако прогресс холодильной техники, появление более эффективных машин и циклов, новые, более жесткие экологические требования – все это создает предпосылки для нового технологического «витка» применения воды в качестве хладагента.*

Примером инновационного технического решения, позволяющего использовать воду в качестве рабочего вещества, может служить двухкаскадная холодильная машина с вакуумно-испарительной нижней ступенью, в которой реализуется полукрытая схема охлаждения и замораживания воды (рис. 1). Хладагент (вода) в этой ступени

* В.Мааке, Р.Ю. Эккерт, Ж.-Л.Кошен. Польшман. Учебник по холодильной технике. – М.: Изд-во МГУ, 1998.

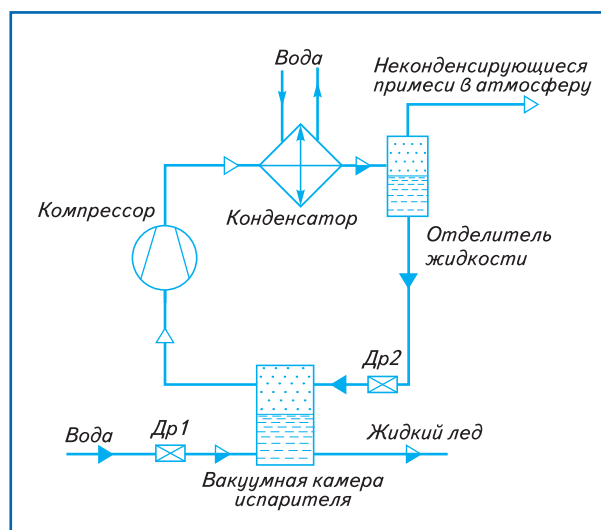


Рис. 1. Схема водяной вакуумно-испарительной ступени

пени (вакуумном блоке) испаряется в вакуумной камере при условиях, близких к состоянию тройной точки воды (давление ниже 610 Па, температура около 0 °С), поглощая большое количество теплоты, и частично кристаллизуется, являясь, таким образом, как рабочим веществом, так и объектом охлаждения. В этой схеме продуктом, аккумулирующим холод, является «жидкий лед» — однородная смесь холодной воды с мелкими кристаллами льда. Он накапливается в нижней части блока — в вакуумной камере — и постоянно выводится насосом наружу. Поэтому для обеспечения непрерывной работы блока в вакуумную камеру все время подаются свежие порции воды для замораживания, и такой процесс можно считать полукрытым.

Водяной пар, образующийся в процессе испарения в вакуумной камере (см. рис. 1), откачивается и сжимается одноступенчатым вакуумным насосом — турбокомпрессором, размещенным в верхней части вакуумного блока. Охлаждение и частичная конденсация горячего пара после компрессора происходят в теплообменнике-конденсаторе. Охлаждающая вода в конденсатор может поступать как от традиционной холодильной машины (чиллера), так и из градирни (если позволяют условия окружающей среды).

В случае объединения водяной вакуумной машины и традиционной пароконденсационной холодильной машины, обеспечивающей охлаждение теплообменника-конденсатора, можно говорить о двухкаскадной схеме организации цикла для получения «жидкого льда». В этом случае в нижней, вакуумной ступени охлаждение осуществляется на уровне примерно $-3...+1$ °С в зависимости от содержания в воде соли, которая интенсифицирует кристаллизацию воды и снижает адгезию, т.е. налипание ледяной корки на внутренних поверхностях блока. Верхняя ступень обеспечивает охлаждение теплообменника-конденсатора на среднетемпературном уровне (примерно 8...12 °С), перенося таким образом теплоту конденсации водяных паров в окружающую среду.

Процессы нижней ступени локализованы в вакуумном блоке (рис. 2), где смонтированы: вакуумный насос-турбокомпрессор 1, приводимый электродвигателем ЭД; промежуточный теплообменник-конденсатор 2 и мешалка-гомогенизатор 3 в нижней части вакуумной камеры, которая предотвращает слипание кристаллов льда. На входе в турбокомпрессор размещен обогреваемый отбойник-сепаратор кристаллов льда и капель воды. Образующийся в процессе работы «жидкий лед» насосом 4 перекачивается к потребителям холода.

Исследования показывают, что эффективность подобных каскадных холодильных установок уве-

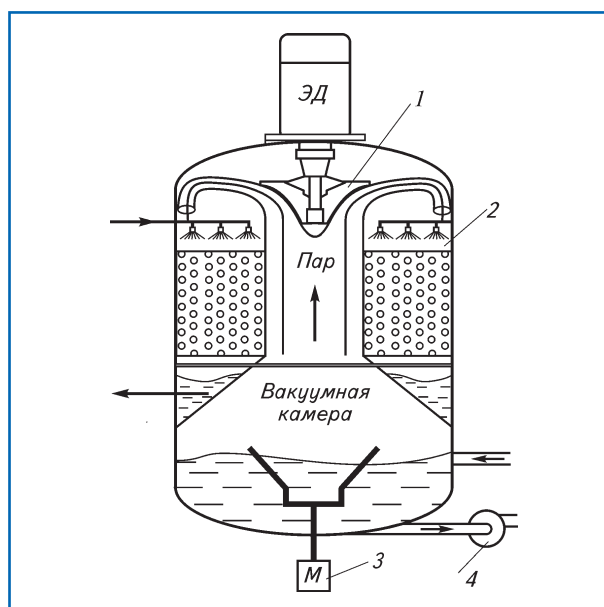


Рис. 2. Конструктивная схема вакуумного блока: 1 — вакуумный насос-турбокомпрессор; 2 — теплообменник-конденсатор смешанного типа; 3 — мешалка-гомогенизатор; 4 — насос

личивается с ростом единичной мощности при холодопроизводительностях свыше 1000 кВт. Их эффективность и экономичность превосходят показатели всех других холодильных установок для получения «жидкого льда». Однако такие установки имеют большие габаритные размеры, так как в условиях вакуума плотность водяных паров низкая.

Для откачивания из вакуумной камеры больших объемов водяных паров необходим вакуумный насос-компрессор большой производительности, которую могут обеспечить компрессоры динамического типа. Поэтому в установке используется ра-



Рис. 3. Колесо центробежного турбокомпрессора с лопатками из углепластика

диально-осевой центробежный турбокомпрессор с нехарактерными для холодильной техники размерами: диаметр колеса более 2 м (рис. 3). Колесо выполнено сборным. Для снижения динамических нагрузок его лопатки изготовлены из углепластика (рабочая частота вращения колеса около 5600 об/мин). Турбокомпрессор с относительно невысокими степенями сжатия, размещенный непосредственно внутри вакуумного блока, работает с минимальными потерями давления (а они в условиях вакуума играют определяющую роль) и, как следствие, обеспечивает высокую эффективность и экономичность нижнего каскада.

Теплообменник-конденсатор, охлаждающий и конденсирующий горячие водяные пары после сжатия в турбокомпрессоре, конструктивно может быть выполнен либо как рекуператор, либо как регенератор-смесительный холодильник. В первом случае пары охлаждаются хладагентом или непосредственно хладагентом через теплообменную поверхность, во втором — при непосредственном контакте горячего пара с холодной водой, распыляемой в объеме (как это показано на рис. 2). В этом случае для интенсификации теплообмена воды с разреженным паром область конденсатора заполнена насадкой типа колец Рашига. Для охлаждения его может использоваться холодная вода из градирни или даже из открытого водоема. Если же это невозможно, то для повышения надежности работы холодильной установки используется вторая ступень охлаждения — водоохлаждающая холодильная машина (чиллер).

Принципиальная схема двухкаскадной машины с вакуумной ступенью на воде для производства «жидкого льда» и искусственного снега приведена на рис. 4. В нижней ступени охлаждения рабочим веществом служит вода, в верхней ступени охлаждения используется озонобезопасный хладагент R134a.

Образующийся в вакуумной камере «жидкий лед» выводится с помощью насоса. В процессе подпитки водой в блок поступает и растворенный в ней воздух, поэтому нижний каскад дополняется системой непрерывного вакуумирования и удаления неконденсирующихся примесей.

Чтобы уменьшить количество водяных паров, откачиваемых из вакуумной камеры, минимизировать работу сжатия в нижней ступени охлаждения и повысить ее эффективность, теплая вода, поступающая на подпитку, не сразу дросселируется в вакуумную камеру, а сначала смешивается с водоледяной смесью, так что в вакуумную камеру поступает вода с температурой, близкой к 0 °С, и парообразование при дросселировании сопровождается процессом кристаллизации. Кроме того, при смешении «жидкого льда» с теплой водой кристаллы льда дополнительно скругляются и уменьшаются. Холодная

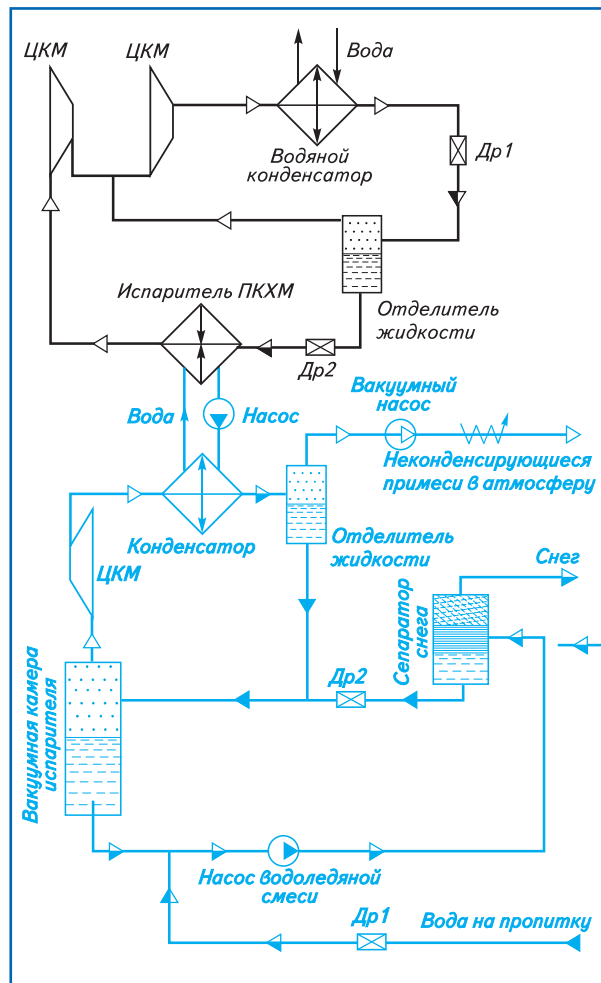


Рис. 4. Схема двухкаскадной холодильной установки для получения «жидкого льда» и снега: синим цветом выделена нижняя ступень охлаждения, черным — верхняя (вспомогательная пароконденсационная машина)

вода распыляется через форсунки непосредственно в объеме вакуумной камеры с образованием взвеси пара, капель воды и кристаллов льда. Кристаллы льда с каплями воды оседают и перемешиваются мешалкой-гомогенизатором. Использование турбинного гомогенизатора «жидкого льда» и подогрев внутренних конструкций и стенок блока предупреждают образование крупных монолитных кристаллов льда и намерзание льда на внутренних стенках, что способствует стабильной работе блока.

Кроме того, для увеличения эффективности установки в целом в верхней ступени охлаждения можно использовать центробежный двухступенчатый компрессор с превосходными энергетическими показателями: его холодильный коэффициент равен 7,5 (для условий работы рассматриваемой установки).

Для получения искусственного снега установка дополняется специальным гравитационным сепаратором (см. рис. 4). В этом случае «жидкий



*Рис. 5. Вакуумные блоки:
а — для систем кондиционирования золотодобывающей шахты; б — для промышленного кондиционирования и аккумуляции холода; в — для производства искусственного снега*

лед» из вакуумной камеры направляется в сепаратор, где происходит его разделение: в нижней части концентрируется жидкая фаза, а в верхней — влажный снег. Холодная вода из нижней точки сепаратора возвращается в вакуумную камеру, а твердая фаза снимается скребком в верхней части сепаратора и накапливается в виде мокрой снежной массы, которая через несколько минут высыхает и приобретает все свойства естественного снега.

В настоящее время вакуумные блоки (льдогенераторы) описанной выше конструкции производятся под маркой «VIM» («VACUUM ICE MAKER») израильской фирмой IDE — мировым лидером в области обработки воды (рис. 5). Первой областью использования крупнотоннажного льдогенератора было производство «жидкого льда» в крупной системе кондиционирования золотодобывающей шахты в Африке (рис. 5, а). Позднее подобные генераторы нашли применение в промышленных системах кондиционирования и аккумуляции холода (рис. 5, б). В зависимости от содержания кристаллов в «жидком льде» существенно (в 7–10 раз) увеличивается удельная способность хладоносителя воспринимать тепло (до 160...200 кДж/кг) по сравнению с водой (~20 кДж/кг) или традиционными незамерзающими хладоносителями. Поэтому использование «жидкого льда» позволяет снижать капитальные и эксплуатационные затраты таких промышленных систем.

В последние годы подобные установки стали использоваться для производства высококачественного искусственного снега (рис. 5, в) при положи-

тельных температурах, что особенно актуально в связи с последствиями глобального потепления и приближением зимних Олимпийских игр в Сочи. На многих олимпийских объектах прогнозируются положительные температуры воздуха и нехватка снега, что делает невозможным использование традиционных вентиляторных снегогенераторов — «снежных пушек» и «ружей», способных работать лишь при температурах воздуха ниже -5°C .

Работа всепогодных снегогенераторов на базе двухкаскадных пароконденсационных холодильных машин с вакуумно-испарительной ступенью (вакуумных снегогенераторов) не требует энергоемких холодильных установок, в них используется минимум дополнительного оборудования. Для кристаллизации воды служит скрытая теплота испарения воды, а не внешнее охлаждение. При такой технологии охлаждения сводятся к минимуму все потери, что обеспечивает высокую эффективность: удельные энергетические затраты вакуумных снегогенераторов по сравнению с другими типами всепогодных систем получения искусственного снега в 4–5 раз ниже.

Есть у этих установок еще одна важная особенность: в отличие от классических холодильных установок не накоплено никакого опыта их эксплуатации. Такие снегогенераторы не будут прощать даже малейших нарушений условий эксплуатации, поэтому к работе на них можно будет допускать только квалифицированных специалистов, хорошо понимающих особенности рабочих процессов и способных адекватно и быстро реагировать на все возникающие ситуации. Можно сказать, что эти



Рис. 6. Вид на горнолыжные трассы с вакуумными снегогенераторами (г.Питцаль, Австрия)

установки относится к классу интеллектуальных холодильных установок и поэтому их внедрение и эксплуатацию можно доверить только «интеллектуалам».

Снег в таких снегогенераторах получается отличного качества: практически не отличается от естественного, обладает высокой плотностью, прочностью, износостойкостью, отлично слипается и подходит для всех зимних видов спорта. Сочетание экономической эффективности и высокого качества получаемого снега открывает новые возможности в развитии зимних видов спорта.

Технические характеристики вакуумного снегогенератора для производства 560 т снега в сутки приведены ниже.

<i>Характеристики снегогенератора на базе двухкаскадной парокompрессионной машины с вакуумно-испарительной ступенью</i>	
Массовая снегопроизводительность, т/сут	560
Объемная снегопроизводительность, м ³ /сут	1020
Диаметр зерен производимого снега, мм	0,5...1,0
Качество производимого снега	Естественный весенний снег
Полезная холодопроизводительность, кВт	1750
Энергопотребление системы генерации снега, кВт	235
Общее энергопотребление комплекса снегопроизводства, кВт	650
Удельный расход электроэнергии на единицу массы снега, кВт·ч/т	27,9

Отличительной особенностью рассмотренных снегогенераторов является большая единичная производительность, поэтому они лучше всего подходят для гарантированного всепогодного оснежения крупных спортивных объектов и открытых лыжных трасс, для которых необходимо большое количество качественного снега. Два таких снегогенератора с 2009 г. эксплуатируются на ев-

ропейских горнолыжных курортах – в г. Церматт (Швейцария) и г. Питцаль (Австрия) (рис. 6). Множество международных комиссий, в том числе российская олимпийская делегация, посетили эти объекты. Их представители были поражены качеством и объемами производимого снега. Много положительных отзывов о качестве снега поступило и от профессионалов лыжного спорта в Международную федерацию лыжного спорта (FIS). Поэтому FIS включила вакуумные снегогенераторы с положительным отзывом в свой официальный бюллетень технологий, применяемых в профессиональном лыжном спорте.

* * *

Описанная двухкаскадная холодильная машина с вакуумно-испарительной нижней ступенью может служить примером появления на рынке инновационного решения, сочетающего высокие показатели эффективности со снижением роли озоноразрушающих и парниковых газов. Компания «ХИМХОЛОДСЕРВИС» разработала на базе такого снегогенератора проект системы оснежения трамплинного комплекса и трассы лыжного двоекборья для зимней олимпиады «Сочи-2014».

Областью применения двухкаскадных машин с вакуумно-испарительной ступенью могут быть крупные системы кондиционирования с разветвленной сетью трубопроводов и большим числом аппаратов охлаждения (например, для крупных офисных центров или шахт). Использование «жидкого льда» в качестве хладоносителя позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты на кондиционирование и положительно влияет на экологию окружающей среды. В некоторых случаях система кондиционирования с использованием двухкаскадных холодильных машин с вакуумно-испарительной ступенью для получения «жидкого льда» не имеет альтернативы.