

КАСКАДНАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА С ВАКУУМНОЙ СТУПЕНЬЮ НА ВОДЕ

Рассмотрена инновационная двухкаскадная холодильная установка с вакуумной нижней ступенью, использующая в качестве рабочего тела воду. Вакуумная ступень смонтирована в едином блоке, который включает в себя уникальный по размерам турбокомпрессор, концевой теплообменник-конденсатор, камеру с мешалкой и другие элементы. Такое конструктивное решение позволило создать экологичные холодильные установки, которые обеспечивают высокие показатели эффективности в сочетании со снижением роли озоноразрушающих и парниковых рабочих тел. На базе таких установок уже сегодня разрабатываются высокопроизводительные рефрижераторы, генераторы жидкого льда и снегогенераторы.

E-mail: kolosov@power.bmstu.ru; artemov@himholod.ru

Ключевые слова: парокompрессионный цикл, ступень сжатия, каскадная холодильная установка, каскад охлаждения, вакуумный блок, вода как хладагент, жидкий лед, экологическая безопасность, энергетическая эффективность.

В последние годы вода в качестве рабочего тела холодильных машин находит весьма ограниченное применение, например, в парожетторных или абсорбционных холодильных машинах. Это связано с высокой температурой тройной точки воды ($0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$), низкими давлениями кипения и проблемами конструирования компрессоров для этих условий. Однако ужесточение экологических требований и появление на рынке более эффективных машин создают предпосылки для реализации новых циклов, использующих воду в качестве хладагента.

Таким примером применения воды в качестве хладагента может служить двухкаскадная холодильная установка с вакуумно-испарительной нижней ступенью, в которой вода охлаждается и частично замораживается. В нижней ступени вода испаряется в вакуумной камере, поглощая большое количество теплоты, при условиях, близких к тройной точке воды, т.е. при давлении примерно 600 Па и при температуре около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вода выступает в этом цикле и как рабочее тело, и как аккумулятор произведенного холода. Продуктом работы такой холодильной установки является жидкий лед (бинарный лед, ледяная шуга, ice slurry) — гомогенная смесь кристаллов льда и воды, которая перекачивается как жидкость и имеет прекрасные хладоаккумулирующие показатели.

Использование каскадного цикла при температуре замерзания воды теоретически совершенно неоправданно. Однако использование встроенной конструкции турбокомпрессора и теплообменника-конденсатора в сочетании с низкими давлениями испарения и большим объемом перекачиваемых водяных паров делают такое техническое оформление цикла эффективным и оправданным.

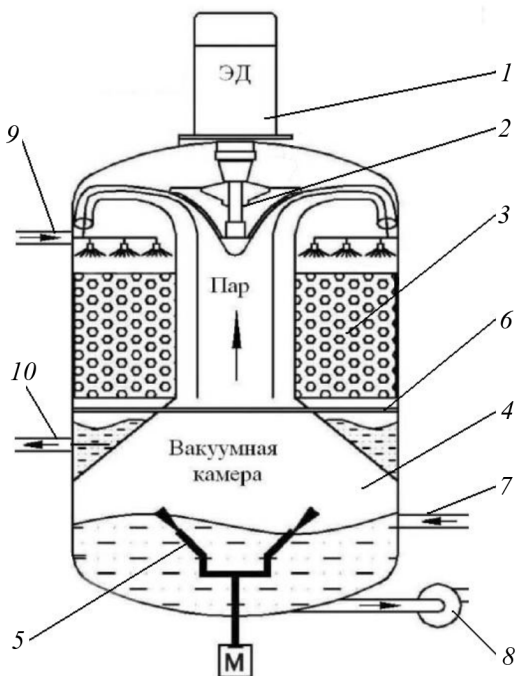


Рис. 1. Принципиальная конструкция вакуумного блока

Процессы вакуумно-испарительного цикла на нижней ступени охлаждения локализованы в одном вакуумном сосуде (вакуумном блоке), который показан на рис. 1. В нем смонтированы: вакуумный насос-турбокомпрессор 2 с приводом от электродвигателя ЭД 1, промежуточный теплообменник-конденсатор 3 и мешалка-гомогенизатор 5 с приводом от мотора (М) в нижней части вакуумной камеры 4. На входе в турбокомпрессор размещен обогреваемый отбойник-сепаратор кристаллов льда и капель воды 6. По каналу 7 в вакуумную камеру 4 поступают и распыляются свежие порции воды. Образующийся жидкий лед откачивается из вакуумного блока центробежным насосом 8. Для охлаждения пара после компрессора по каналу 9 поступает и по каналу 10 отводится хладоноситель.

В нижней части вакуумного блока находится камера, в объеме которой происходит непрерывное испарение и кристаллизация воды. Свежие порции воды поступают в эту камеру и распыляются через инжекторы. При инжектировании и дросселировании эта вода частично испаряется, поглощая значительное количество энергии. Поэтому другая часть воды охлаждается и при условиях ниже тройной точки кристаллизуется. Образуется смесь воды со льдом (жидкий лед), которая непрерывно перемешивается мешалкой и частично откачивается насосом наружу из вакуумного блока.

Водяной пар, образующийся в процессе инжектирования, перемещается вверх к турбине (показано стрелкой) и сжимается одноступенно.

пенчатым турбокомпрессором, размещенным в верхней части вакуумного блока. После этого в теплообменнике-конденсаторе горячие пары охлаждаются и частично конденсируются хладагентом, например, охлажденной водой, которая может поступать как от чиллера, так и просто из градирни, если это позволяют условия окружающей среды. Мешалка-гомогенизатор 5 в нижней части вакуумной камеры 4 предотвращает слипание кристаллов льда и формирует однородную структуру жидкого льда. Такой процесс можно считать полуоткрытым, поскольку со свежими порциями воды в вакуумный блок поступает некоторое количество неконденсирующихся газов, которые должны непрерывно откачиваться дополнительной системой вакуумирования.

В случае объединения этого вакуумно-испарительного цикла на воде с традиционной пароконденсационной холодильной машиной можно говорить о двухкаскадном холодильном цикле получения жидкого льда. Для интенсификации процесса кристаллизации воды и снижения адгезии, т.е. налипания ледяной корки на внутренних поверхностях вакуумной камеры, в воду добавляется соль. Поэтому в нижней, вакуумной ступени реализуется охлаждение на уровне примерно от -3 до $+1$ °С в зависимости от содержания соли. Верхняя ступень обеспечивает охлаждение теплообменника-конденсатора на уровне от 8 до 12 °С и завершает перенос теплоты кристаллизации воды к окружающей среде.

Расчеты показывают, что эффективность подобных холодильных установок увеличивается с ростом их единичной мощности и становится оптимальной при холодопроизводительностях свыше 1000 кВт. В этом случае эффективность и экономичность таких установок превосходят показатели всех других типов льдогенераторов и традиционных холодильных установок.

Для откачки из вакуумной камеры водяных паров в больших объемах необходим вакуумный насос большой производительности, в роли которого эффективно можно использовать только турбокомпрессор. Поэтому в установке используется радиально-осевой центробежный турбокомпрессор с большим (более 2 м) колесом (рис. 2). Колесо, вращающееся с частотой до 5600 об/мин, выполняется сборным, с лопатками из углепластика, входные кромки которых усилены титаном.

Турбокомпрессор размещен непосредственно внутри вакуумного блока, работает на относительно невысоких степенях сжатия при минимуме потерь давления, которые в условиях вакуума играют определяющую роль. Поэтому он обеспечивает высокую эффективность всего нижнего каскада.

Теплообменник-конденсатор, охлаждающий и частично конденсирующий водяные пары после турбокомпрессора, может быть выполнен как рекуператор или регенератор (смесительный холодильник).

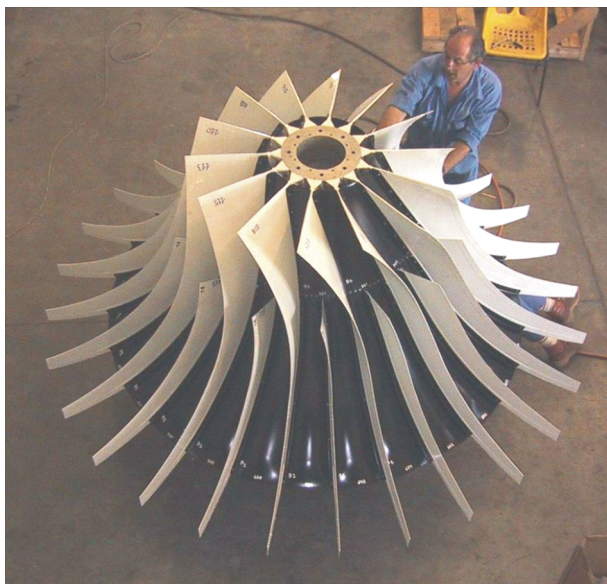


Рис. 2. Внешний вид колеса центробежного турбокомпрессора

В первом случае пары охлаждаются хладагентом или непосредственно хладагентом через теплообменную поверхность, а во втором случае – при непосредственном контакте горячих водяных паров с холодной водой, распыляемой в объеме (см. рис. 1). В этом случае для охлаждения может использоваться холодная вода из градирни или даже из открытого водоема. Для интенсификации теплообмена воды с разреженным паром объем регенератора заполняется насадкой, например типа колец Рашига. Если же требуется надежная работа такой установки или поблизости нет источника холодной воды, то используется чиллер.

Принципиальная схема двухкаскадного снегогенератора с вакуумно-испарительной ступенью на воде и парокомпрессионным чиллером приведена на рис. 3. В нижнем каскаде охлаждения хладагентом служит вода, а в верхнем каскаде используется озонобезопасный хладагент, например R134a. Холодильная машина верхнего каскада работает при высокой температуре испарения и поэтому не требует больших затрат энергии и использует минимум дополнительного оборудования.

Образующийся в вакуумной камере жидкий лед перекачивается центробежным насосом наружу к сепаратору снега. В процессе подпитки водой в вакуумный блок поступают воздух и другие растворенные в воде газы. Поэтому нижний каскад дополняется системой вакууммирования и удаления неконденсирующихся газов.

Чтобы уменьшить количество водяных паров, откачиваемых из вакуумной камеры, минимизировать работу сжатия в нижней ступени охлаждения и повысить ее эффективность, теплую воду, по-

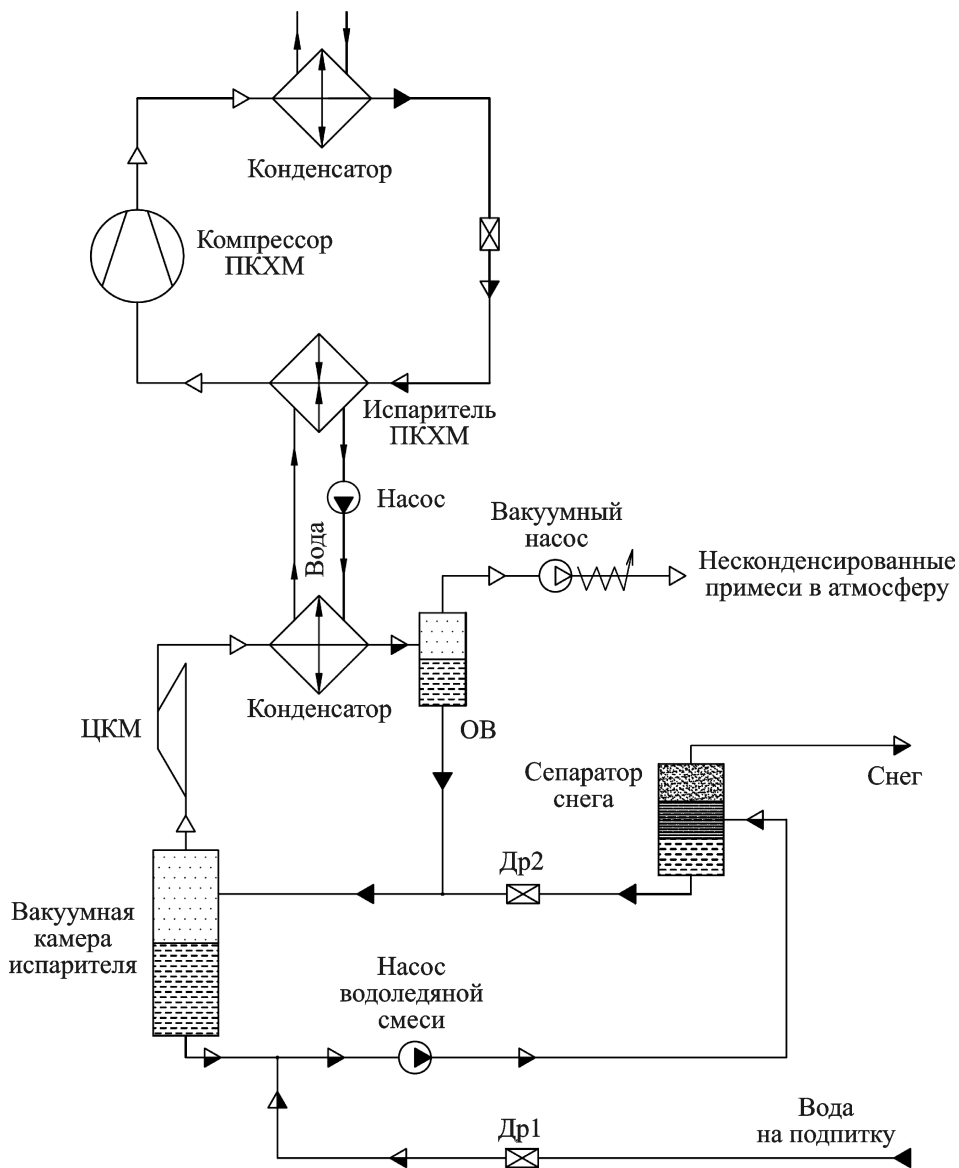


Рис. 3. Схема холодильного цикла каскадной установки

ступающую на подпитку, перед инжектированием в вакуумную камеру смешивают с холодной водой из сепаратора снега. Поэтому в вакуумную камеру поступает и дросселируется вода с температурой, близкой к 0°C . При дросселировании до давления тройной точки вода частично замерзает и в объеме вакуумной камеры образуется взвесь пара, капель воды и кристаллов льда. Кристаллы льда и капли воды оседают вниз вакуумной камеры и перемешиваются мешалкой-гомогенизатором. Использование этого гомогенизатора и подогрев внутренних конструкций и стенок камеры предупреждают намерзание льда на внутренних стенках.



Рис. 4. Вакуумный блок для системы кондиционирования

В настоящее время вакуумные блоки подобного типа производятся под маркой VIM (VACUUM ICE MAKER) фирмой IDE (www.ide-tech.com). На рис. 4 показан такой блок в составе крупнотоннажного льдогенератора, используемого для аккумуляции холода в системе кондиционирования крупного отеля в Японии. Использование жидкого льда в системах кондиционирования эффективно вследствие значительного (в 7–10 раз) увеличения его способности воспринимать теплоту. Удельная способность жидкого льда воспринимать теплоту составляет 160. . . 20 кДж/кг в зависимости от содержания кристаллов, что существенно больше значения (~ 20 кДж/кг), характерного для воды или других традиционных незамерзающих хладоносителей.

В последнее время подобные установки стали использоваться для крупнотоннажного производства искусственного снега (рис. 5). В этом случае установка дополняется гравитационным сепаратором снега, куда “жидкий лед” перекачивается из вакуумной камеры (см. рис. 3). В верхней части такого сепаратора концентрируется влажный снег, а в нижней части — жидкость, холодная вода. Вода из нижней части возвращается в вакуумный блок, а снег сверху скребком сталкивается в накопитель мокрой снежной массы, которая быстро подсыхает и приобретает все свойства естественного снега. Для удаления следов соли на поверхности кристаллов, снег в сепараторе отмывается прохлад-



Рис. 5. Вакуумный блок VIM в составе снегогенератора

ной водой. Кристаллы льда при этом дополнительно скругляются и уменьшаются, что несколько улучшает качество снега.

Охлаждение и кристаллизация воды в таких снегогенераторах происходит в основном за счет испарения самой воды, за счет теплоты ее фазового перехода. При таком охлаждении сводится к минимуму большинство потерь, что и обеспечивает высокую эффективность замораживания воды. Удельные энергетические затраты таких снегогенераторов в 4–5 раз ниже, чем у других типов всепогодных снегогенераторов. Вакуумный блок может, но редко, применяться индивидуально, а чаще его устанавливают в установки в качестве нижнего каскада охлаждения.

Пока такие установки имеют ограниченный опыт применения и, как правило, эксплуатируются в опытно-промышленном режиме. Их эксплуатация может проводиться только квалифицированными специалистами, хорошо понимающими особенности их рабочих процессов.

Технические характеристики снегогенератора производительностью 560 т снега в сутки приведены ниже. Снег в таких снегогенераторах получается отличного качества, так называемый весенний снег, практически не отличается от естественного и имеет высокие

плотность, прочность, отлично слипается и подходит для всех зимних видов спорта.

Характеристика снегогенератора производительностью 560 т снега в сутки

Массовая производительность, т/сут	560
Объемная производительность, м ³ /сут	1020
Диаметр зерен производимого снега, мм	0,5... 1,0
Полезная холодопроизводительность, кВт	1750
Энергопотребление системы, кВт	235
Общее энергопотребление установки, кВт	650
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/тонну снега	27,9

Описанная каскадная холодильная установка с вакуумной ступенью на воде сочетает в себе высокие показатели эффективности со снижением роли озоноразрушающих и парниковых газов и поэтому может служить примером современного инновационного решения в области умеренного холода. Отличительная особенность таких установок – их высокая эффективность и большая единичная мощность. Они лучше всего подходят для крупных потребителей холода или жидкого льда: крупных пищевых и рыбоперерабатывающих предприятий, припортовых холодильников; для оснежения открытых лыжных трасс и т.д. С 2009 г. такие снегогенераторы эксплуатируются на двух европейских горнолыжных курортах: Церматт (Швейцария) и Питцтал (Австрия). Областью их применения, кроме того, могут быть системы кондиционирования крупных офисных центров или шахт с разветвленной сетью, с большим числом зон и аппаратов охлаждения. Использование жидкого льда в качестве хладагента позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты на кондиционирование и положительно влияет на экологию окружающей среды. В некоторых системах кондиционирования использование жидкого льда может не иметь альтернативы.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012