

## 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.*

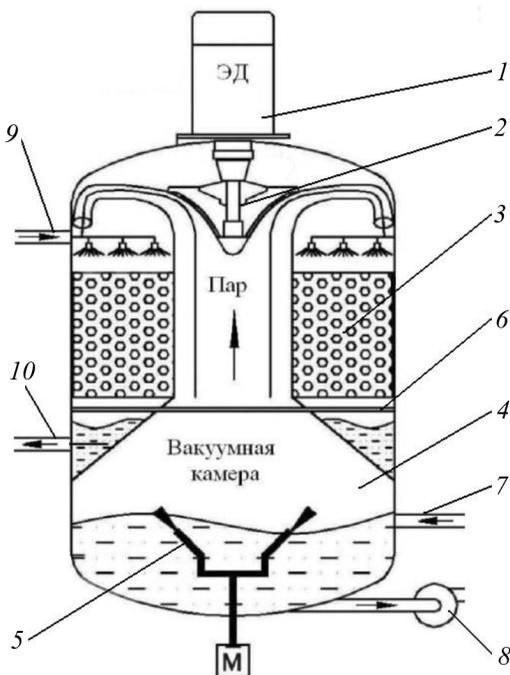
**E-mail:** kolosov@power.bmstu.ru; artemov@himholod.ru

**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  $600\text{ Па}$  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 хладонотеплоноситель.

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 одноступенчатой турбиной.

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 пароконденсационным 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-

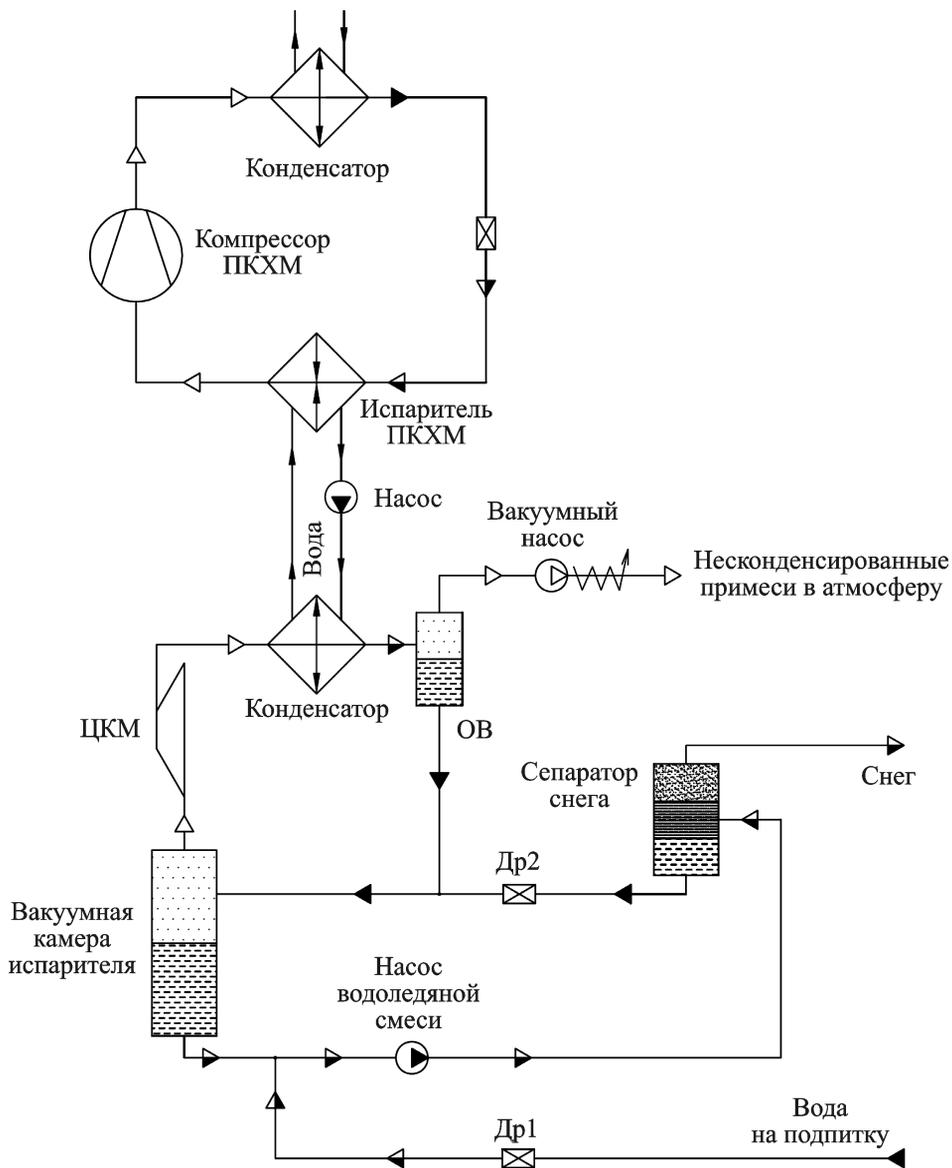


Рис. 3. Схема холодильного цикла каскадной установки

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  $0^{\circ}\text{C}$ . 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](http://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 ( $\sim 20$  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 <sup>3</sup> /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