

УДК 621.56

Т.П. МИХАЙЛЕНКО¹, И.И. ПЕТУХОВ¹, П.Д. ЖЕМАНИЮК², А.Ю. БАСОВ²¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ШАХТНОГО ВОЗДУХА

Рассмотрена возможность применения осевых компрессоров в системе кондиционирования шахтного воздуха на базе технологии водяной шуги (жидкого льда). Определены показатели эффективности компрессоров, при которых установки такого типа превосходят традиционные холодильные машины, используемые для охлаждения шахтного воздуха.

водяная шуга, жидкий лед, осевой компрессор, охлаждение шахтного воздуха, система кондиционирования, энергетическая эффективность

Введение

Микроклимат шахты оказывает непосредственное влияние на технологические условия, безопасность горных работ и производительность труда шахтёров. От него зависят возможность механизации работ, устойчивость горных пород и уровень травматизма. Регламентация микроклимата шахты направлена, в первую очередь, на охрану здоровья шахтёров. В Украине для шахт принята предельно допустимая температура 26 °С при скорости воздуха около 2 м/с и влажности до 90%. Ввиду большой глубины шахт затраты на кондиционирование воздуха весьма значительны. Наиболее перспективно обеспечение необходимого уровня параметров микроклимата шахты с использованием природных и вторичных ресурсов тепла и холода, энергосберегающих технологий.

Постановка и решение задачи

Технология жидкого льда (суспензии воды и мелких ледяных кристаллов) представляет интерес для систем кондиционирования шахтного воздуха. За счёт теплоты фазового перехода хладоресурс жидкого льда в 4...6 раз выше по сравнению с охлажденной водой или рассолом [1 – 5], используемыми в традиционных системах кондиционирования

шахт. Это позволяет повысить эффективность системы кондиционирования и снизить стоимость оборудования, о чем свидетельствует проведенный авторами сравнительный анализ системы кондиционирования воздуха на примере шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодонуголь".

В состав системы кондиционирования шахтного воздуха (рис. 1) входят расположенная на поверхности станция холодильных машин (СХМ), теплообменный аппарат высокого давления (ТВД) и сеть воздухоохлаждителей (СОВ), расположенные на глубине 956 м.

Станция холодильных машин, охлаждающая первичный холодоноситель с 11,8 до 0,8 °С, включает установленные последовательно две турбокомпрессорные холодильные машины 2ХТМ-23 с суммарной холодопроизводительностью 3900 кВт и холодильным коэффициентом 3,5.

В качестве первичного холодоносителя в рассматриваемой системе кондиционирования используется рассол NaCl 14,1% концентрации, циркулирующий с объемным расходом 0,09362 м³/с по контуру СХМ-ТВД-СХМ и охлаждающий в ТВД вторичный холодоноситель – воду с 20,6 до 5 °С. Вторичный холодоноситель циркулируя по контуру ТВД-СОВ-ТВД охлаждает проходящий через воздухоохлаждители шахтный воздух до 18 °С.

Трубопровод первичного холодоносителя состоит из теплоизолированной прямой и обратной ветви подачи диаметром 0,325 м и длиной 1350 м каждая, проходящих в стволе шахты. По стволу шахты движется воздух со средней скоростью 4,6 м/с и средней температурой 22,4 °С. При течении первичного теплоносителя по трубопроводу плотность теплово-

го потока за счет внешних теплопритоков составляет 55 Вт/м² для прямой ветви и 27,5 Вт/м² – для обратной. Хладоресурс первичного холодоносителя расходуется на охлаждение вторичного холодоносителя в ТВД (3787 кВт), компенсацию теплопритоков и мощности на прокачку теплоносителя (порядка 100 кВт).

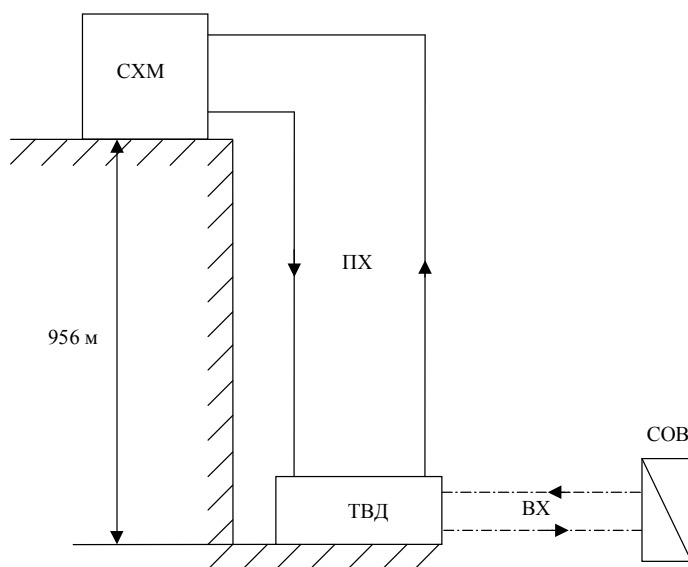


Рис. 1. Блок-схема системы кондиционирования шахтного воздуха шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодунголь":

СХМ – станция холодильных машин;
ТВД – теплообменный аппарат высокого давления;
СОВ – сеть воздухоохладителей;
ПХ – первичный холодоноситель;
ВХ – вторичный холодоноситель

Анализ системы кондиционирования воздуха на примере шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодунголь" показал, что использование жидкого льда в качестве первичного холодоносителя позволяет повысить эффективность системы кондиционирования и снизить стоимость оборудования. Так при прокачке жидкого льда с 40% (по массе) концентрацией кристаллов льда (полученного из рассола 3,5% NaCl) по существующему трубопроводу расход холодоносителя снижается почти в 5 раз, а затраты на прокачку в 60 раз. Кроме этого использования жидкого льда в системе кондиционирования шахтного воздуха позволяет уменьшить поверхность теплообменника высокого давления в 1,3 раза,

а диаметр трубопровода первичного холодоносителя в 1,8 раза. Даже при уменьшении диаметра трубопровода в 1,8 раза затраты на прокачку остаются в 4,5 раза меньше.

Установки и технологии для производства жидкого льда можно разделить на скребковые (с механическим съёмом образующегося на охлаждаемой поверхности льда) и объёмной кристаллизации, когда лёд зарождается и растёт в объёме переохлаждённого водного раствора солей, этилен- или пропилен гликоля.

Опытно-промышленная установка для охлаждения шахтного воздуха, как и демонстрационная установка для получения водяной шуги, соз-

данная в ОАО «Мотор Сич» совместно со специалистами ХАИ, реализует технологию производства жидкого льда при испарительном охлаждении жидкости [6]. Преимуществами таких установок являются высокий коэффициент теплопередачи из-за прямого контакта охлаждаемой и охлаждающей сред и реализации теплообмена при парообразовании в жидкости, возможность регулирования размеров кристаллов льда в сме-

си, использование экологически чистого хладагента – воды. Учитывая полученные при эксплуатации демонстрационной установки результаты, выбрана схема с вакуумированием парового пространства ёмкости с перемешиваемым рассолом. По такой схеме работает и установка «ECOSHILL» фирмы INTEGRAL (Германия) [1]. Функциональная схема опытно-промышленной установки представлена на рис.2.

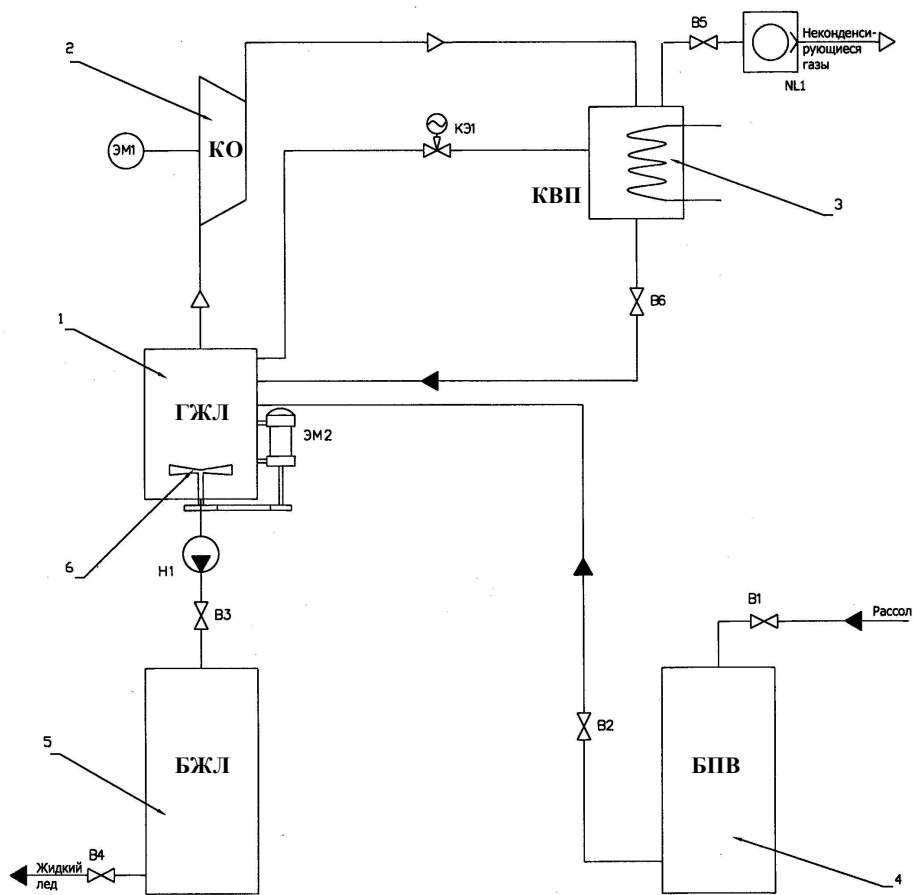


Рис. 2. Функциональная схема опытно-промышленной установки для производства водяной шуги
 1 – генератор жидкого льда; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – блок подготовки воды;
 5 – бак-накопитель жидкого льда; 6 – механическая мешалка

Установка состоит из генератора жидкого льда 1, компрессора 2, конденсатора 3, блока подготовки воды 4, бака-накопителя жидкого льда 5. Генератор 1 представляет собой теплоизолированную емкость, оснащенную механической мешалкой 6, приводимой во вращение электродвигателем ЭМ2. В качестве привода компрессора 2 используется электродви-

гатель ЭМ1. Для предотвращения неустойчивой работы компрессора (помпаж), в установке предусмотрена перепускная магистраль с электроуправляемым клапаном КЭ1. Вакуумный насос NL1 обеспечивает предварительное вакуумирование установки перед запуском компрессора 2, а на стационарном режиме удаляет неконденсирующиеся газы.

Принцип действия опытно промышленной установки основан на образовании кристаллов льда в объеме жидкости, водного раствора с доэвтектической концентрацией растворяемого вещества. Охлаждение жидкости в генераторе жидкого льда 1 происходит за счет частичного испарения при вакуумировании. Образующийся водяной пар сжимается в компрессоре 2 и подается в конденсатор 3, где от него отводится теплота при температурах близких к окружающей среде. Далее конденсат возвращается в испаритель (генератор жидкого льда). Тем самым замыкается обычный парокомпрессионный холодильный цикл, где в качестве хладагента используется вода. При выходе установки на стационарный режим по получению жидкого льда из блока подготовки воды 4 происходит подпитка генератора 1 свежей порцией рассола и отбор жидкого льда в бак-накопитель 5.

Для подпитки генератора 1 свежей порцией рассола, установка оснащена блоком подготовки воды 4. Рассол из него поступает в генератор по магистрали с вентилем В2 за счет разности давлений в генераторе и блоке подготовки воды. Для накопления жидкого льда используется бак-накопитель жидкого льда 5, в который насосом Н1 по магистрали с вентилем В3 из генератора 1 подается шуга с заданной концентрацией кристаллов. Для дальнейшего использования жидкого льда потребителем предусмотрена магистраль с вентилем В4. Пройдя через потребитель холода, шуга переходит в жидкое состояние и по магистрали с вентилем В1 подается в блок подготовки воды 4 или непосредственно в генератор ЖЛ.

Параметрами энергетической эффективности установки выступают холодопроизводительность Q_0 и холодильный коэффициент ε . Холодопроизводительность установки в значительной степени определяется объемной производительностью компрессора. От этого агрегата в значительной степени зависит и энергетическая эффективность установки.

При использовании жидкого льда в качестве первичного холодоносителя в системе кондициони-

рования шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодунголь" для обеспечения требуемой холодопроизводительности установки объемная производительность компрессора должна составлять

$$\dot{V}^{(v)} = \frac{Q_0}{\rho^{(v)} \psi_{lv}}, \quad (1)$$

где $\dot{V}^{(v)}$ – объемная производительность компрессора, м³/с; $\rho^{(v)}$ – плотность водяного пара на входе в компрессор, кг/м³.

Холодильный коэффициент установки выражается в виде отношения холодопроизводительности к потребляемой при вакуумировании мощности N :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{N}, \quad (2)$$

где N – действительная мощность компрессора, Вт.

С учетом адиабатного сжатия откачиваемого из генератора жидкого льда водяного пара действительная мощность компрессора определится из соотношения

$$N = \frac{c_p^{(v)} T^{(v)} (\pi_k^k - 1)}{\eta_k} \dot{V}^{(v)} \rho^{(v)}, \quad (3)$$

где $c_p^{(v)}$ – удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении, Дж/(кг·К); $T^{(v)}$ – температура водяного пара на входе в компрессор, К; π_k – степень повышения давления в компрессоре; k – показатель адиабаты водяного пара; η_k – коэффициент полезного действия компрессора.

КПД компрессора оказывает влияние на холодильный коэффициент установки, поэтому вопрос проектирования компрессоров для данной технологии производства жидкого льда является одним из основных.

В табл. 1 приведены параметры установки для производства жидкого льда при различном КПД компрессора. Отметим, что указанная в таблице объемная производительность может обеспечиваться параллельно включенными осевыми компрессорами. При базовом компрессоре двигателя АИ-20 таких компрессоров должно быть не менее двадцати.

Таблица 1

Параметры установки для производства жидкого льда

КПД компрессора	0,4	0,45	0,5	0,6
Объемная производительность компрессора, м ³ /с	411,7	411,7	411,7	411,7
Степень повышения давления	6,9	6,9	6,9	6,9
Концентрация ЖЛ, % (по массе)	40	40	40	40
Концентрация NaCl в ЖЛ, % (по массе)	3,5	3,5	3,5	3,5
Температура в генераторе ЖЛ, °С	- 4,35	- 4,35	- 4,35	- 4,35
Давление в генераторе ЖЛ, Па	470	470	470	470
Холодопроизводительность установки, кВт	3901,2	3901,2	3901,2	3901,2
Холодильный коэффициент	3,25	3,66	4,06	4,88

При КПД осевого компрессора 0,45 и выше (табл. 1) холодильный коэффициент установки по производству жидкого льда превышает таковой для типовых агрегатов систем кондиционирования шахтного воздуха. Например, для холодильной машины 2ХТМ-23 шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодонуголь" холодильный коэффициент составляет 3,5.

При использовании вакуумных бустерных насосов холодильный коэффициент установки ЖЛ снижается до значения 3,25. Это соответствует использованию осевого компрессора с КПД равным 0,4. Но даже при таком значении КПД компрессора система кондиционирования шахтного воздуха с использованием жидкого льда является более эффективной по сравнению с традиционной, так как снижаются затраты на прокачку, металлоемкость и стоимость конструкции системы вследствие уменьшения диаметров трубопроводов и поверхности теплообменника высокого давления.

Литература

1. FLO-ICE - Совместное предприятие между INTEGRAL Energietechnik GmbH, Flensburg / Germany и Solmecs FLO-ICE Systems Ltd., Лондон / Великобритания и Торонто / Канада [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energ-ice.com>.

2. Сайт «Sunwell Technologies Inc.» [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sunwell.com>.

3. Pearson A.B., Blackhurst D.R. Chilling and freezing food with ice slurries // International institute of refrigeration. – Commission C2. – Bristol, UK. – 2001. – P. 29-33.

4. Wang M.J., Lopez G., Goldstein V. Ice slurry for shrimp farming and processing // Proc. of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. – Stockholm, Sweden. – 2002. – P. 161-168.

5. Laude-Bousquet A., Fournaison L. Technology use of ice slurries // Proc. of the Fifth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration. – Stockholm, Sweden. – 2002. – P. 169-174.

6. Эффективность установок для производства жидкого льда при вакуумировании / И.И. Петухов, Т.П. Михайленко, П.Д. Жеманюк, А.И. Таран, П.А. Бакши // Тр. 13-й Межд. конф. по компрессоростроению "Компрессорная техника и пневматика в XXI веке". – Сумы: СумГУ, 2004. – Т. 3. – С. 47-52.

Поступила в редакцию 16.05.2007

Рецензент: д-р физ-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.