

УДК 621.56

Т.П. МИХАЙЛЕНКО<sup>1</sup>, И.И. ПЕТУХОВ<sup>1</sup>, П.Д. ЖЕМАНИЮК<sup>2</sup>, А.Ю. БАСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>ОАО «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 м<sup>3</sup>/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/м<sup>2</sup> для прямой ветви и 27,5 Вт/м<sup>2</sup> – для обратной. Хладоресурс первичного холодоносителя расходуется на охлаждение вторичного холодоносителя в ТВД (3787 кВт), компенсацию теплопритоков и мощности на прокачку теплоносителя (порядка 100 кВт).

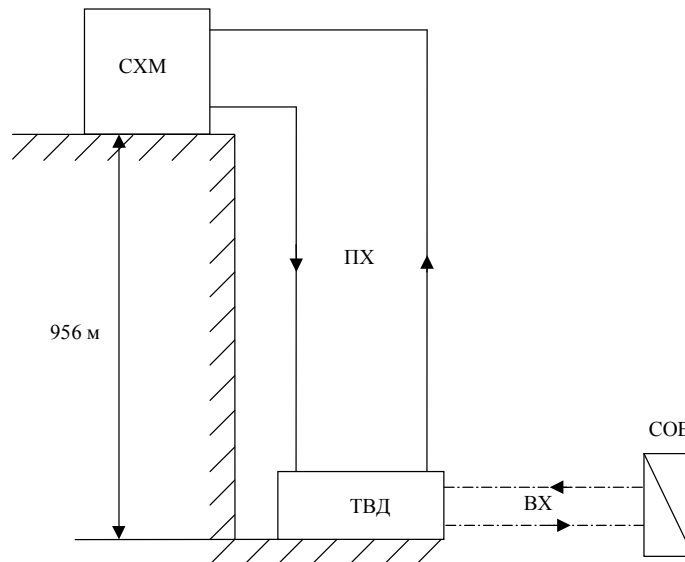


Рис. 1. Блок-схема системы кондиционирования шахтного воздуха шахты "Самсоновская-Западная" ГП "Краснодунголь":

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.

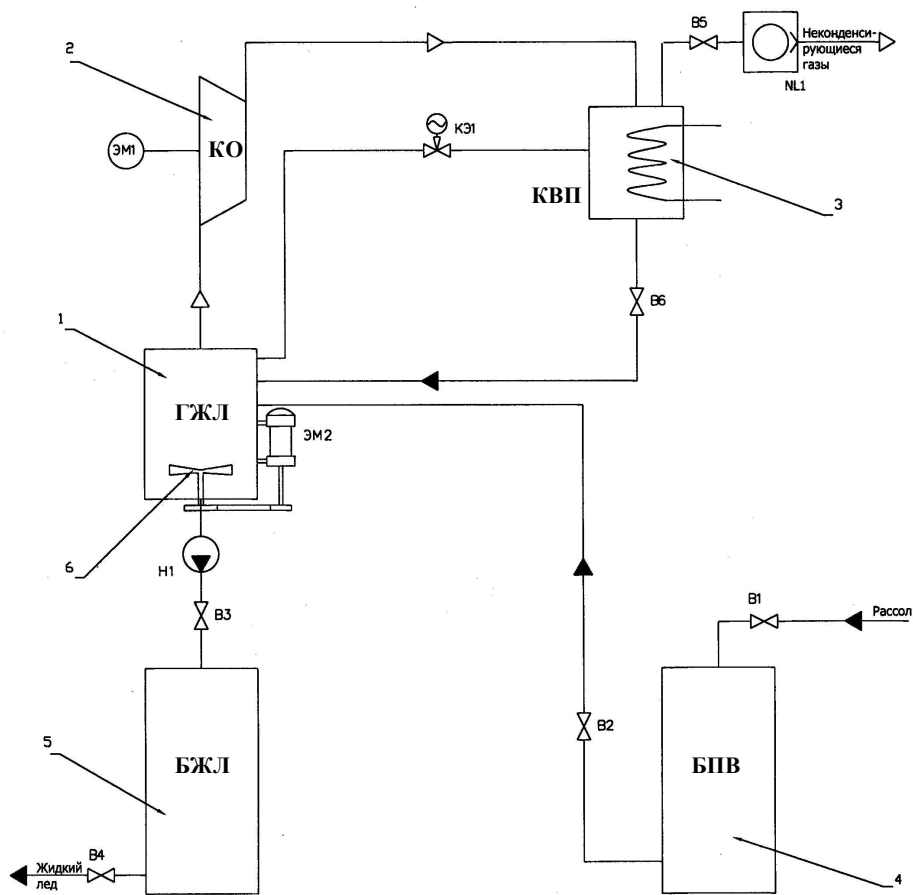


Рис. 2. Функциональная схема опытно-промышленной установки для производства водяной шуги  
 1 – генератор жидкого льда; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – блок подготовки воды;  
 5 – бак-накопитель жидкого льда; 6 – механическая мешалка

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 пароконденсационный 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  $\varepsilon$ . 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, м<sup>3</sup>/с;  $\rho^{(v)}$  – плотность водяного пара на входе в компрессор, кг/м<sup>3</sup>.

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;  $\pi_k$  – степень повышения давления в компрессоре;  $k$  – показатель адиабаты водяного пара;  $\eta_k$  – 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 <sup>3</sup> /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.