

УДК 621.56

Т.П. МИХАЙЛЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЯНОЙ ШУГИ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

*Рассмотрено использование технологии жидкого льда в системе кондиционирования шахт. Определены основные требования к жидкому льду при использовании его в качестве промежуточного теплоносителя. Представлены результаты сравнительного анализа систем кондиционирования воздуха с традиционным промежуточным теплоносителем и жидким льдом. Показано, что использование жидкого льда в качестве промежуточного теплоносителя позволяет повысить эффективность системы кондиционирования, снизить ее стоимость и энергоёмкость используемого оборудования.*

**Ключевые слова:** холодильная установка, система кондиционирования, теплоноситель, жидкий лед, рассол, эффективность.

**Введение**

Жидкий лед (ЖЛ) представляет собой водяную шугу – суспензию воды и мелких кристаллов льда. За счёт теплоты фазового перехода хладоресурс ЖЛ в 4...6 раз выше по сравнению с охлажденной водой или рассолом [1, 2]. Он может перекачиваться на большие расстояния. Гидродинамические свойства жидкого льда зависят от формы и доли ледяных частиц, скорости потока. Прокачку жидкого льда с содержанием мелких (менее 1 мм) кристаллов льда до 40% можно осуществлять при помощи центробежных насосов. Не рекомендуется использовать ЖЛ с концентрацией кристаллов свыше 50%. При транспортировке его скорость должна быть не ниже 0,5 м/с, так как возможно расслоение потока и объединение кристаллов льда в конгломерат [1]. Благодаря своим свойствам жидкий лед привлекателен для

различных отраслей промышленности. Для реализации технологии жидкого льда могут использоваться осевые лопаточные компрессора авиационных двигателей [3], что расширяет область их применения.

**Постановка и решение задачи**

Высокий хладоресурс жидкого льда в сравнении с рассолом или охлажденной водой позволяет в несколько раз уменьшить расход теплоносителя при заданной холодопроизводительности системы. Это делает выгодным применение жидкого льда для систем кондиционирования воздуха с промежуточным теплоносителем. Рассмотрим это на примере системы кондиционирования воздуха шахты "Самсоновская - Западная" ГП "Краснодонуголь" (рис. 1). Данные для анализа представлены проектным институтом «Южгипрошат», г. Харьков.

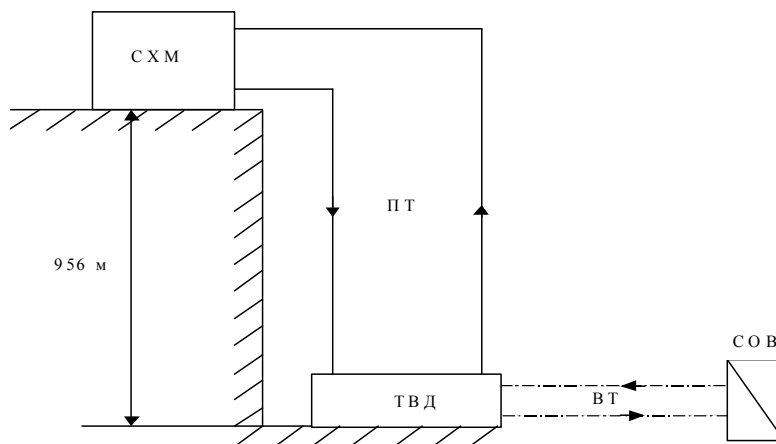


Рис. 1. Блок-схема системы кондиционирования шахтного воздуха шахты:

СХМ – станция холодильных машин; ТВД – теплообменный аппарат высокого давления; СОВ – сеть воздухоохладителей; ПТ – первичный теплоноситель; ВТ – вторичный теплоноситель

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

Станция холодильных машин, охлаждающая первичный теплоноситель с 11,8 °С до 0,8 °С, представляет собой установленные последовательно две турбокомпрессорные холодильные машины 2ХТМ-23 с суммарной холодопроизводительностью 3901,2 кВт и холодильным коэффициентом 3,5.

В качестве первичного теплоносителя в рассматриваемой системе кондиционирования используется рассол NaCl 14,1% концентрации, охлаждающий в ТВД вторичный теплоноситель – воду с 20,6 °С до 5 °С. Вторичный теплоноситель в свою очередь охлаждает проходящий через воздухоохладители шахтный воздух до 18 °С.

Трубопровод первичного теплоносителя состоит из теплоизолированной прямой и обратной ветви подачи диаметром 0,325 м и длиной 1350 м каждая, проходящих в стволе шахты.

Хладоресурс первичного теплоносителя расходуется на компенсацию тепловой нагрузки за счет охлаждения вторичного теплоносителя в ТВД, теплопритоков и мощности на прокачку теплоносителя. При использовании в качестве первичного теплоносителя жидкого льда, полученного из рассола, расход теплоносителя составит

$$\dot{G}^{(sl)} = \frac{Q_0}{c_p^{(l)}(T_1^x - T_{sl}) + g^{(s)}\psi_{sl}}, \quad (1)$$

где  $\dot{G}^{(sl)}$  – массовый расход жидкого льда, кг/с;

$Q_0$  – тепловая нагрузка, Вт;

$c_p^{(l)}$  – удельная теплоемкость рассола, Дж/(кгК);

$T_1^x$  – температура первичного теплоносителя на входе в станцию холодильных машин, К;

$T_{sl}$  – температура кристаллизации рассола, К;

$g^{(s)}$  – концентрация кристаллов льда в рассоле;

$\psi_{sl}$  – теплота плавления льда, Дж/кг.

При определении массового расхода необходимо учитывать, что при подводе теплоты к жидкому льду происходит плавление кристаллов льда. Это приводит к уменьшению концентрации рассола, что в свою очередь оказывает влияние на его теплоемкость и температуру кристаллизации [4].

Объемный расход  $\dot{V}^{(sl)}$  жидкого льда определяется соотношением

$$\dot{V}^{(sl)} = \frac{\dot{G}^{(sl)}}{\rho^{(sl)}}, \quad (2)$$

где  $\rho^{(sl)}$  – плотность жидкого льда, кг/м<sup>3</sup>.

При использовании жидкого льда в системе кондиционирования диаметр трубопровода первичного теплоносителя уменьшится, и для заданной холодопроизводительности определится соотношением

$$d^{(sl)} = d_0 \sqrt{\frac{\dot{V}^{(sl)}}{\dot{V}_0}}, \quad (3)$$

где  $d^{(sl)}$  – диаметр трубопровода первичного теплоносителя при подаче жидкого льда, м;

$d_0$  – исходный диаметр трубопровода первичного теплоносителя, м;

$\dot{V}_0$  – объемный расход исходного первичного теплоносителя, м<sup>3</sup>/с.

Уменьшение диаметра трубопровода также приведет к соответствующему снижению внешнего теплового потока  $Q_{вн}$  к трубопроводу, который определяется из соотношения (4), что отразится на расходе первичного теплоносителя.

$$Q_{вн} = \pi d^{(sl)} (q_{пв} l_{пв} + q_{ов} l_{ов}), \quad (4)$$

где  $q_{пв}$ ,  $q_{ов}$  – плотность теплового потока за счет внешних теплопритоков для прямой и обратной ветви трубопровода первичного теплоносителя, соответственно, Вт/м<sup>2</sup>;

$l_{пв}$ ,  $l_{ов}$  – длина прямой и обратной ветви трубопровода, м.

На рис. 2 показано влияние диаметра трубопровода первичного теплоносителя при течении по нему жидкого льда с концентрацией кристаллов льда 40% (по массе) и концентрацией рассола NaCl 3,5% (по массе) на расход первичного теплоносителя.

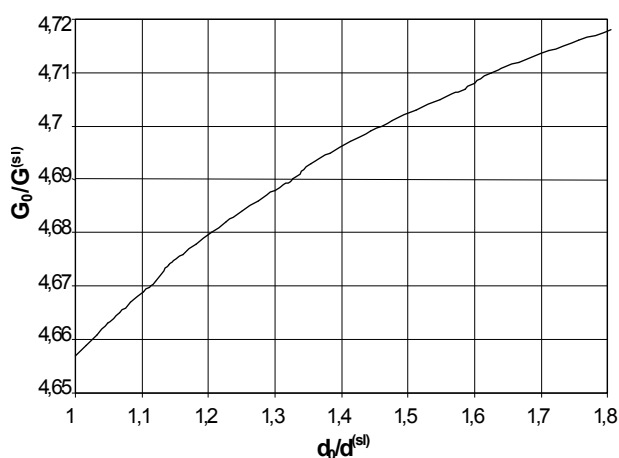


Рис. 2. Влияние диаметра трубопровода на расход первичного теплоносителя за счет изменения доли теплопритоков в суммарной тепловой нагрузке

Уменьшение диаметра трубопровода первичного теплоносителя (по сравнению с исходным) снижает внешние теплопритоки за счет уменьшения поверхности трубопровода, участвующей в теплообмене с окружающим теплым воздухом шахты. Это в свою очередь приводит к уменьшению суммарной тепловой нагрузки.

Следствием вышеперечисленного является то, что расход первичного теплоносителя снижается. Как показано на рис. 2, использование жидкого льда в качестве первичного теплоносителя в системе кондиционирования шахтного воздуха позволяет уменьшить, по сравнению с исходными значениями параметров, диаметр трубопровода первичного теплоносителя в 1,8 раза, а массовый расход теплоносителя – в 4,7 раз.

При течении исходного первичного теплоносителя потеря напора в прямой и обратной ветви трубопровода составляет  $\Delta p_0 = 0,25$  МПа. В случае использования жидкого льда, потеря напора в прямой и обратной ветви трубопровода первичного теплоносителя, согласно [5], составит

$$\Delta p^{(sl)} = \frac{\dot{G}^{(sl)2}}{2\rho^{(sl)}A^2} (\lambda \frac{l_{пв} + l_{об}}{d^{(sl)}} + \zeta_{\Sigma}), \quad (5)$$

где  $\Delta p^{(sl)}$  – потеря напора в прямой и обратной ветви трубопровода первичного теплоносителя при течении жидкого льда, Па;

$A$  – площадь проходного сечения канала, м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;

$\zeta_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент местного сопротивления.

На рис. 3 показано влияние изменения диаметра трубопровода первичного теплоносителя при использовании жидкого льда на величину потери напора в трубопроводе.

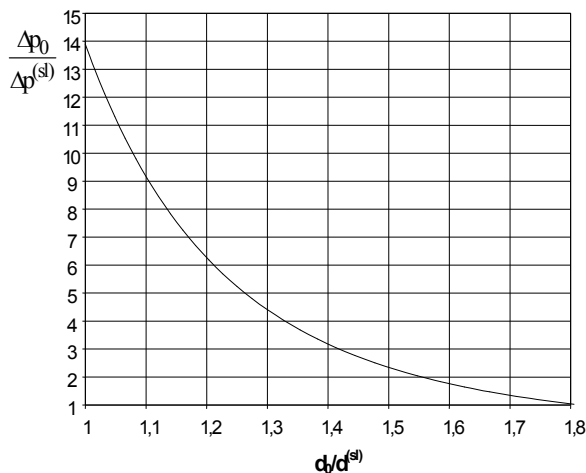


Рис. 3. Потеря напора при различном проходном сечении трубопровода первичного теплоносителя

При использовании жидкого льда с 40% концентрацией кристаллов и 3,5% концентрацией NaCl в существующем трубопроводе позволяет снизить гидравлические потери в 14 раз (рис. 3), что обусловлено снижением массового расхода теплоносителя.

Для прокачки исходного теплоносителя (рассола) по прямой и обратной ветви трубопровода необходимо затратить  $N_0 = 23,3$  кВт мощности. Затраты на прокачку жидкого льда по тому же трубопроводу составят:

$$N^{(sl)} = \Delta p^{(sl)} \dot{V}^{(sl)}. \quad (6)$$

На рис. 4 представлено соотношение затрат на прокачку исходного теплоносителя (рассола) и жидкого льда с 40% (по массе) концентрацией кристаллов и 3,5% (по массе) концентрацией рассола NaCl.

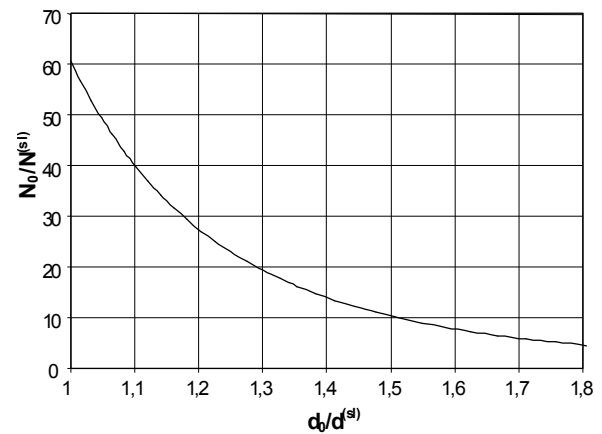


Рис. 4. Затраты на прокачку первичного теплоносителя

## Заключение

Проведенный анализ системы кондиционирования воздуха показал, что при прокачке жидкого льда с 40% (по массе) концентрацией кристаллов льда, полученного из рассола 3,5% NaCl, по существующему трубопроводу расход теплоносителя снижается почти в 5 раз, а затраты на прокачку первичного теплоносителя – в 60 раз. Кроме этого, использование жидкого льда в системе кондиционирования шахтного воздуха позволяет уменьшить поверхность теплообменника высокого давления в 1,3 раза, а диаметр трубопровода первичного теплоносителя в 1,8 раза, при этом затраты на прокачку теплоносителя снижаются в 4,5 раза. Таким образом, использование жидкого льда в качестве промежуточного теплоносителя позволяет повысить эффективность системы кондиционирования, снизить ее стоимость и энергоемкость используемого оборудования.

### Литература

1. Дворжак З. Бинарный лёд / З. Дворжак // Холодильный бизнес. – 2000. – № 3. – С. 6-9, 44.
2. К вопросу получения бинарного льда в условиях вакуумирования жидкостей / П.Д. Жеманюк, А.И.Таран, П.А. Бакиш и др. // Холодильна техніка і технологія. – 2003. – № 3(83). – С. 13-17.
3. Эффективность установок для производства жидкого льда при вакуумировании / И.И. Петухов, Т.П. Михайленко, П.Д. Жеманюк и др. // Труды XIII Междунар. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». – Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. – Т. 3. – С. 47-52.
4. Богданов С.Н. Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник / С.Н. Богданов, О.П. Иванов, О.П. Куприянова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
5. Теплотехнический справочник. В 2 т. Т. 2 / Под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.

Поступила в редакцию 6.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой энергетики и физики Н.И. Погожих, Харьковский государственный университет питания и торговли, Харьков, Украина.

### ВИКОРИСТАННЯ ВОДЯНОЇ ШУГИ В СИСТЕМАХ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

*Т.П. Михайленко*

Розглянуто використання технології рідкого льоду в системі кондиціонування шахт. Визначені основні вимоги до рідкого льоду при використанні його як проміжний теплоносій. Представлені результати порівняльного аналізу систем кондиціонування повітря з традиційним проміжним теплоносієм і рідким льодом. Показано, що використання рідкого льоду як проміжного теплоносія дозволяє підвищити ефективність системи кондиціонування, понизити її вартість і енергоємність устаткування, що використовується.

**Ключові слова:** холодильна установка, система кондиціонування, теплоносій, рідкий лід, розсіл, ефективність.

### SLURRY ICE APPLICATION FOR AIR-CONDITIONING SYSTEMS WITH INTERMEDIATE HEAT MEDIUM

*T.P. Mikhailenko*

Slurry ice technology application for mine air conditioning system are discussed. The basic requirements to intermediate heat medium as slurry ice are described. Comparative analysis results of air-conditioning systems with traditional intermediate heat medium and slurry ice application are submitted. It was shown that slurry ice application as intermediate heat medium to raise air conditioning system efficiency and to reduce cost and power consumption of equipment.

**Key words:** refrigeration unit, air conditioning system, heat medium, slurry ice, brine, efficiency.

**Михайленко Тарас Петрович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник каф. 205, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: k205@d2.khai.edu.