

УДК 621.1.016

АКТУАЛИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ШАХТНЫХ ВОД ДЛЯ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

к.т.н., доц. А.В. Инкин

ГВУЗ „Национальный горный университет”

Введение. Зарубежный научно-практический опыт применения шахтных вод для отопления зданий показывает возможность реализации и рентабельность этой технологии [1]. В настоящее время осуществляется много небольших проектов, в которых тепло воды из затопленных шахт употребляется для обогрева одно-двухэтажных зданий (Германия, Франция, Англия). Наиболее масштабным считается голландский проект, который получил название MinewaterProject. В шахтерском городке Херлен вода шахты, простоявшей затопленной около 30-ти лет, сейчас обогревает около 350 зданий, из которых более 200 – жилые дома. В рамках проекта в пяти разных местах района над сетью штолен было пробурена скважина до глубины 700 м. Вода, наполняющая старую шахту на такой глубине, имеет постоянную температуру 32 °С и с помощью насосов выкачивается наверх. Далее, успев остыть до 28 °С, она попадает в тепловой насос, где используется в качестве источника низкопотенциального тепла для доведения воды в трубах теплоцентрали города до кондиционной температуры. При этом работа насоса не создает вредных выбросов в окружающую среду, что особенно важно для экологически неблагоприятных районов. Отдав заключенное в себе тепло насосам, вода возвращается в шахту и вновь нагревается. Необходимо отметить, что в летний период эта же система способна осуществлять охлаждение зданий путем отбора воды из более высоких горизонтов шахты (глубиной 100 – 200 м), где она имеет меньшую температуру (10 – 13 °С).

Формулировка целей. В Украине одним из ведущих направлений реструктуризации угольной отрасли и восстановления природной среды в угледобывающих регионах является консервация отработанных и нерентабельных шахт. Согласно „Инвестиционной программе развития угольной промышленности” в 2011-2015 году на территории Донбасса намечены к ликвидации 16 угольных предприятий, большая часть из которых уже закрыта [2]. Вследствие этого множество небольших шахтерских городов (Красный луч, Новогродовка, Шахтерск, Свердловск и др.) на фоне постоянно растущих цен на энергоносители ощущают острую нехватку в тепловой энергии. Промышленные и гражданские задания в холодное время года остаются без отопления и горячего водоснабжения. Вместе с тем, в затопленных шахтах сосредоточены значительные техногенные ресурсы тепловой энергии, которые в настоящее время практически не используются. В связи с этим целью данной работы является оценка возможности и рентабельности использования теплового ресурса затопленных шахт Донбасса для отопления и охлаждения зданий с помощью теплового насоса.

Изложение основного материала исследований. В работе [3] была предложена и обоснована геотехнологическая схема использования тепловой энергии ликвидированной шахты „Новгородовская 2” сопряженная с периодической закачкой и отбором шахтных вод из затопленных горных выработок. При этом вода охлажденная в результате обогрева здания до 7 – 8 °С будет поступать на горизонт ± 0 ÷ + 100 м со средней температурой 10 °С, а вода нагретая в результате кондиционирования зданий до 30 °С будет направляться на горизонт с отметками - 300 ÷ - 400 м и температурой 25 °С. Между периодами закачки и последующего отбора шахтных вод существует двухмесячный период простоя, апрель-май для охлаждения зданий и сентябрь-октябрь – для отопления. В виду разности температур затопленных горизонтов и нагнетаемых вод они будут изменять свою температуру, как в период работы, так и в период простоя геотермального модуля. Кроме того, в процессе закачки шахтных вод в виду отсутствия термоизоляции скважин неизбежны потери их температуры в процессе движения воды. Приведенные теплофизические особенности использования шахтных вод для тепло- и холодноснабжения зданий свидетельствуют о необходимости выполнения прогнозов по изменению их температуры.

Снижение температуры горячей воды в скважине при ее закачке в затопленные горные выработки можно рассчитать по расчетной схеме А.Ю. Намиота [4]

$$T(z, t) = T_n + \frac{\Gamma}{\beta} (\beta z - 1) + (T_0 - T_n + \frac{\Gamma}{\beta}) \exp(-\beta z), \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\frac{QC_s}{\lambda_{cp}} \cdot \ln \frac{2Z(t)}{d}}, \quad Z(t) = 2\sqrt{a_{cp}t}$$

где $T(z, t)$ – соответствующая температура на заданной глубине z через t суток после начала закачки воды; T_n, T_0 – температура приведенного к устью скважины нейтрального слоя земли и закачиваемой воды соответственно; Γ – геотермический градиент; β – показатель, характеризующий теплообмен с окружающей средой; Q, C_s – расход и объемная теплоемкость нагнетаемой воды; λ_{cp}, a_{cp} – соответственно средний коэффициент тепло и температуропроводности среды окружающей трубу; d – наружный диаметр трубы.

Результаты расчетов по формуле (1) показаны на рис. 1, а. Из полученных графиков следует, что температура нагнетаемых вод на забое скважины вначале повышается и через некоторое время (приблизительно к середине периода закачки) стабилизируется. Средние потери температуры воды в процессе течения по скважине составят примерно 1,5 °С (не более 5 %). В расчетах были приняты теплофизические свойства пород характерные для затопленной шахты „Новгородовская 2”: $T_n = 8$ °С; $\Gamma = 0,026$ °С/м; $C_s = 4187$ кДж/м³; $\lambda_{cp} = 245$ кДж/м·сут·°С; $a_{cp} = 0,05$ м²/сут. Технологические параметры закачки были следующими: $T_0 = 30$ °С; $d = 0,2$ м; $Q = 670$ м³/сут.

Изменение температуры нагнетаемых вод в затопленных горных выработках может быть определено с помощью аналитического решения Лапшина Н.Н. на основе схемы и формулы Ловерье [5]. Эти решения не учитывают кондуктивный перенос в водоносном горизонте, что допустимо при высоких дебитах и скоростях нагнетания

$$T(r,t) = T_1 + (T_0 - T_1) \operatorname{erfc} \frac{(\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}) \pi (r^2 - r_s^2)}{Q C_{\varepsilon} \sqrt{t - \eta}}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\pi (r^2 - r_s^2) m}{Q \bar{C}}, \quad \bar{C} = \frac{C_{\varepsilon}}{C_{sk}},$$

где $T(r,t)$ – температура шахтных вод на расстоянии r от скважины спустя t суток после начала нагнетания; T_0 – начальная температура подземных вод; $\lambda_1 C_1$ и $\lambda_2 C_2$ – соответственно теплопроводность и объемная теплоемкость пород кровли и подошвы; r_s – радиус скважины; C_{sk} – объемная теплоемкость вмещающих нагнетаемые воды породы.

С помощью выражения (2) представляется возможным выполнить прогноз изменения температуры воды поступающей в затопленный горизонт шахты. На рис. 1, б показано изменение этой температуры на различном расстоянии от забоя нагнетательной скважины. Теплофизические свойства пород были приняты следующими: $\lambda_1 = 221$ кДж/м·сут·°С; $\lambda_2 = 150$ кДж/м·сут·°С; $C_1 = 1840$ кДж/м³; $C_2 = 1656$ кДж/м³.

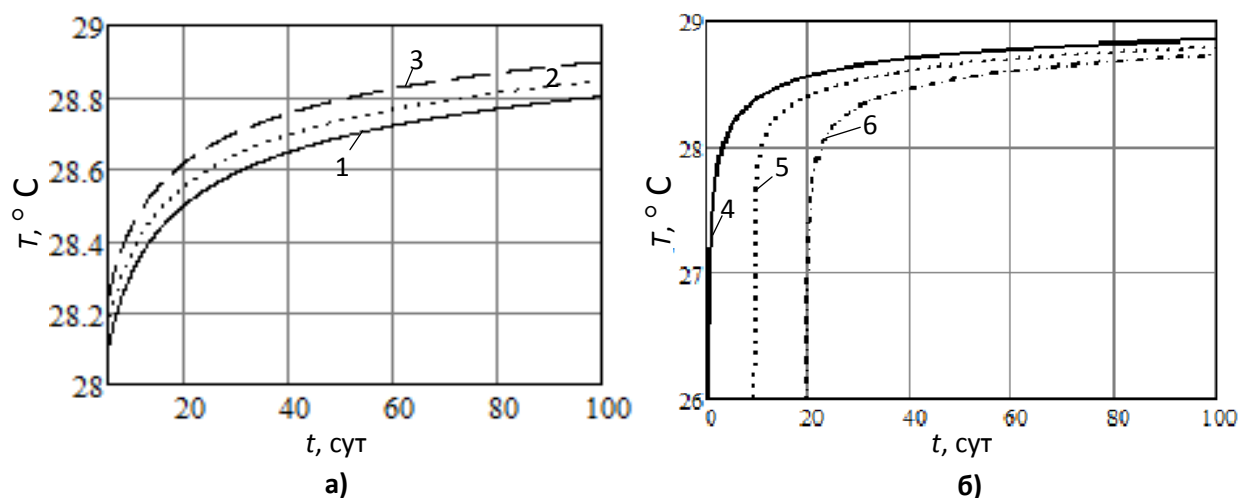


Рис. 1. Изменение температуры воды от длительности ее нагнетания в затопленную шахту на забое скважины (а): 1 – 3 при глубине закачки 600, 550 и 500 м соответственно, и на расстоянии от забоя (б) равном: 4 – 6 – соответственно 1, 15 и 20 м

Для оценки изменения температуры в межотопительный период в формуле (2) расход нагнетательной скважины принимался равным – 0,1 м³/сут, что позволяло учитывать только теплотери в окружающий массив. Результаты расчетов показали, что на протяжении этого периода равного 60 суткам температура шахтных вод не опустится ниже 28 °С. Следующий расчет был вы-

полнен на период отопительного периода (ноябрь-март) во время отбора шахтных вод с глубины 550 м. Установлено, что во время их отбора температура воды сначала незначительно, а затем довольно резко снизится с 28 до 25,5 °С.

Аналогичным образом были выполнены расчеты для случая закачки, простаивания и последующего отбора охлажденных в результате обогрева зданий до 7 – 8 °С шахтных вод нагнетаемых в затопленный горизонт шахты на глубину 100 – 200 м. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в период их отбора температура вод используемых для охлаждения зданий летом будет незначительно изменяться от 8 до 9,5 °С.

Обсуждение результатов. Полученные результаты изменения температуры воды отбираемой из верхних и глубоких горизонтов шахты соответственно во время охладительного и отопительного периода дают возможность оценить рентабельность применения тепловых насосов для тепло- и холодообеспечения зданий. При этом за основной показатель их эффективности приняты коэффициенты преобразования тепла K_m и холода K_x , представляющие собой отношение теплопроизводительности насоса к его электропотреблению и определяемые из следующих выражений

$$K_T = h \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad K_x = h \cdot \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (3)$$

где h – коэффициент термодинамического совершенства; T_1, T_2 – соответственно температура конденсации (потребителя тепла) и испарения хладагента (источника низкопотенциальной энергии), К.

Для определения K_m теплового насоса по формуле (3) использующего в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии шахтную воду, отбираемую с горизонта - 300 ÷ - 400 м необходимо задаться изменением ее температуры (с 28 до 25,5 °С), коэффициентом термодинамического совершенства (принимаясь равным 0,6) и температурой потребителя тепла (температура горячей воды поступающей в систему теплоснабжения – от 50 до 70 °С в зависимости от температуры наружного воздуха). Анализ полученных результатов показывает незначительное уменьшение K_m (не более 0,1) вызванное небольшим колебанием (1 – 3 °С) температуры шахтных вод во время отопительного периода. Аналогичным образом был определен K_x , величина которого слабо увеличивается (не более 0,2) к окончанию летнего периода в связи с уменьшением разности температур между потребителем тепла и источником низкопотенциальной энергии.

Научно-практический интерес вызывает выполнение сравнительного анализа использования шахтных вод в тепловых насосах с другими видами низкопотенциальных источников тепловой энергии (теплота окружающего воздуха, грунтовых вод и природных водных потоков). Для этого в программном комплексе Mathcad были построены графики (рис. 2) изменения K_m и K_x в зависимости от источника и температуры потребителя тепла. Также были построены графики (рис. 3) показывающие экономию тепловой энергии во

время отопительного и летнего периода при использовании шахтных вод в тепловых насосах. В выполненных расчетах были приняты следующие параметры: в отопительный период – температура грунта и водных водоемов соответственно 10 и 5 °С, тепловой поток на отопление зданий в г. Новгородка (15 тыс. чел.) 600 ГДж/сут; в летний период – температура грунта и грунтовых вод 6 и 8 °С, тепловой поток на кондиционирование зданий 168 ГДж/сут.

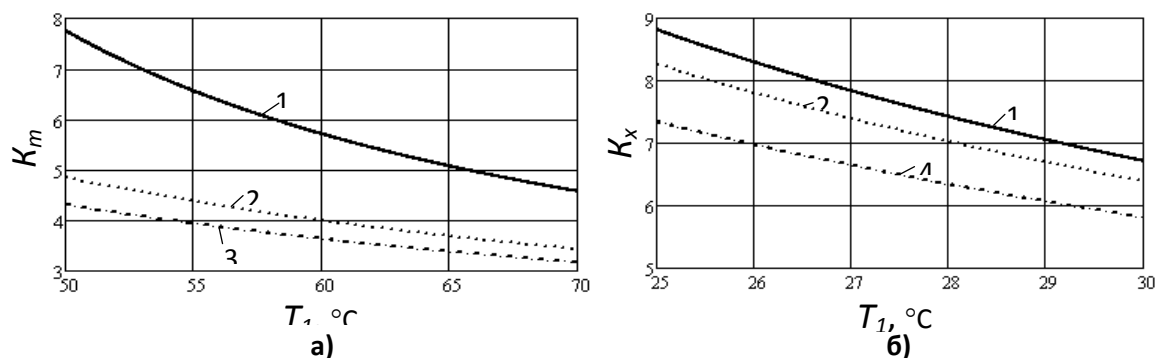


Рис. 2. Изменение коэффициент преобразования тепла (а) и холода (б) теплового насоса при использовании в качестве низкопотенциального источника энергии: 1 – 4 – шахтных вод, грунта, водных водоемов и грунтовых вод соответственно

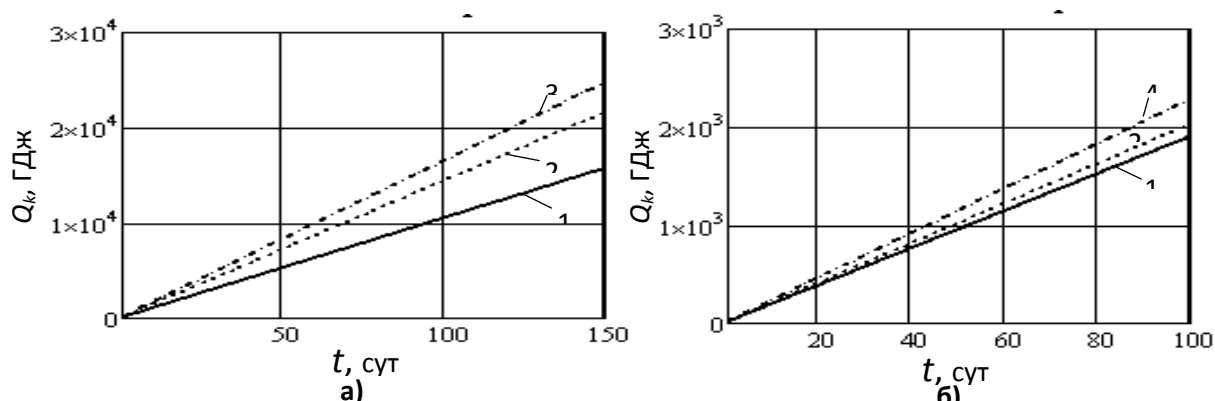


Рис. 3. Изменение выраженной в тепловом эквиваленте мощности (Q_k) затраченной тепловым насосом для отопления (а) и кондиционирования (б) зданий г. Новгорода при использовании в качестве источника низкопотенциальной энергии: 1 – 4 – соответственно шахтных вод, грунта, водных водоемов и грунтовых вод

Анализ графиков на рис. 2 – 3 показывает, что при применении шахтных вод в тепловом насосе достигаются наибольшие коэффициенты преобразования, как тепла, так и холода. Особенно эффективным является употребление шахтных вод в отопительный период. Здесь K_m более чем в 1,5 раза больше, чем при использовании температуры грунта, и около двух раз больше чем при применении водных водоемов в качестве источников низкопотенциальной энергии. При использовании тепла шахтных вод при кондиционировании зданий K_x также превышает свои альтернативные варианты – тепло

грунта и грунтовых вод приблизительно на 10 % и 25 % соответственно. Количество мощности, сэкономленное тепловым насосом в сравнении с альтернативными вариантами, при применении во время отопительного периода шахтных вод в качестве источника низкопотенциальной энергии в среднем составляет 5000 ГДж. Во время кондиционирования зданий, эта величина равна – 300 ГДж. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения в тепловых насосах шахтных вод в качестве низкопотенциального источника энергии.

Выводы. Интенсивное закрытие угольных предприятий в Донбассе на фоне постоянно растущих цен на энергоносители привело к острому дефициту тепловой энергии в ряде небольших городов региона. Вместе с тем в затопленных выработках шахт содержится значительный техногенный ресурс тепла, результативное использование которого возможно путем применения обоснованной в работе геотехнологической схемы включающей в себя периодическую закачку и отбор шахтных вод для их дальнейшего использования в тепловых насосах в качестве источников низкопотенциальной энергии. Решение уравнений теплопроводности в программном комплексе Mathcad позволило установить изменение температуры теплоносителей в процессе их движения по скважинам и аккумуляции в затопленных горизонтах. С помощью полученных результатов был выполнен сравнительный анализ эффективности применения в тепловых насосах различных низкопотенциальных источников теплоты, таких как шахтные и грунтовые воды, окружающий воздух и природные водотоки, по итогам которого установлено, что наибольшие коэффициенты преобразования тепла и холода достигаются при использовании шахтных вод. При этом количество мощности, сэкономленное тепловым насосом на протяжении периодов отопления и охлаждения здания, в среднем составляет 5000 и 300 ГДж соответственно.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Banks, D., A. Fraga Pumar, and I. Watson, The operational performance of Scottish minewater-based ground source heat pump systems. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2009. 42(3): p. 347-357.

2. Садовенко И.А. Динамика фильтрационного массопереноса при ведении и свертывании горных работ / И.А. Садовенко, Д.В. Рудаков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2010. – 216 с.

3. Инкин А.В. Термогидродинамическая оценка эффективности теплового модуля в пределах затопленной шахты / А.В. Инкин // Вестник академии наук Чеченской республики – 2013. – № 4 (21). – С. 97-104.

4. Сучков Б.М. Тем работающих скважин и тепловые методы добычи нефти / Б.М. Сучков. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика”, 2007. – 406 с.

5. Бочеввер Ф.М. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер, И.В. Гармонов, А.В.Лебедев. – М.: Недра, 1965. – 308 с.