

мопластичних полімерів, і палива нафтового походження подібний між собою, що цілком дозволяє використовувати його в якості альтернативного джерела енергії в двигунах внутрішнього згорання наземних транспортно-технологічних засобів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Хіммотологія наземних транспортно-технологічних засобів : навч. посібник / В. М. Коваленко, Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв, В. В. Слободчиков. – К. : Аграр Медіа Груп, 2012. – Ч. I : Палива моторні. – 300 с.
2. Полянський С. К. Експлуатаційні матеріали для автомобілів і будівельно-дорожніх машин : підручник / С. К. Полянський, В. М. Коваленко. – К. : Либідь, 2005. – 504 с.
3. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справочник / [И. Г. Анисимов, К. М. Бадаштова, С. А. Бнатов и др.]; под ред. В. М. Школьников. – [2-е изд.]. – М. : Техинформ, 1999. – 596 с.

УДК 621.1.016

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ

**И.А. Садовенко**, доктор технических наук, профессор кафедры гидрогеологии и инженерной геологии

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина

**А.В. Инкин**, кандидат технических наук, докторант кафедры гидрогеологии и инженерной геологии

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [inkin@ua.fm](mailto:inkin@ua.fm)

**Аннотация.** На основе анализа климатических условий Западного Донбасса рассчитаны тепловые нагрузки, возникающие при отоплении и кондиционировании зданий жилого микрорайона. По результатам моделирования фильтрации и теплопереноса в водоносных коллекторах, используемых в качестве хранилищ тепловой энергии, установлена пространственно-временная динамика формирования термальных ореолов при закачке и отборе теплоносителей. Определена энергетическая мощность природных теплоресурсов и экономия энергии при использовании подземных вод для тепло- и холодоснабжения коммунального сектора.

*Ключевые слова:* водоносные коллекторы, тепловая энергия, аккумуляция, подземные воды.

## MODELING OF WORK UNDERGROUND ACCUMULATION SYSTEM OF THERMAL ENERGY

**I. Sadovenko**, Doctor of Technical Science, Professor of Department hydrogeology and engineering geology

State Higher Educational Institution "National mining university", Dnepropetrovsk, Ukraine

**O. Inkin**, Candidate of Technical Science, Doctoral of Department hydrogeology and engineering geology

State Higher Educational Institution "National mining university", Dnepropetrovsk, Ukraine,

e-mail: [inkin@ua.fm](mailto:inkin@ua.fm)

**Abstract.** Thermal loadings, that occurring at heating and conditioning of estate buildings were estimated on the basis of analysis of climatic terms of Western Donbas. Space and time dynamics of thermal aureole forming during injection and pumping of heat transfer has been established according to the results of modeling of flow and heat transport in the aquifer as thermal energy storage. Power and natural energy resources economy was certain due to ground water using warm - and cold of engineering building supply.

*Keywords: aquiferous collectors, thermal energy, accumulation, underwaters.*

**Введение.** Для Украины актуален поиск нетрадиционных способов получения и хранения тепловой энергии. Применяемые в мировой практике [1] для аккумуляции теплоносителей такие типы природных резервуаров, как соляные полости и истощенные углеводородные залежи, не могут рассматриваться как основные ввиду ограниченности их распространения на территории промышленных центров страны. Так, в горно-геологических условиях Донбасса снижение энергетических нагрузок в промышленном и жилищно-коммунальном секторах может быть достигнуто за счет тепло-емкостного ресурса затопленных шахт. Наличие в массивах горных пород зон обладающих герметичностью, большой теплообменной поверхностью и проницаемостью, достаточной для фильтрации жидкого теплоносителя, создают предпосылки для создания в них системы подземного накопления и хранения тепловой энергии.

Аккумулирующие геосистемы предназначены для отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования зданий соответственно за счет сохранения летнего тепла и зимнего холода в водоносных коллекторах. Такая система состоит из скважин, через которые с земной поверхности в пласт закачивается вода с температурой, характерной для данного времени года (рис. 1). Одни скважины служат для хранения тепла, другие – холода [2]. Летом вода из "холодных" скважин поступает в систему кондиционирования воздуха и, отдав холод, уже с более высокой температурой закачивается в пласт через "теплые" скважины. Таким образом, по

мере подачи холодоносителя потребителю, в пласте происходит сокращение запаса холода и одновременное увеличение запаса тепла. Зимой направление процесса меняется. Теплая вода через тепловой насос подается для отопления и горячего водоснабжения зданий, и после отдачи тепла, поступает в пласт-коллектор через "холодные" скважины. При этом в пласте возрастает запас холода, а запас тепла уменьшается.

Хранение теплоносителей в водоносных пластах для тепло- и холодоснабжения зданий является одним из наиболее быстро развивающихся направлений применения возобновляемой энергии в мире. Ежегодный прирост таких систем в более чем 30 странах за прошедшие 10 лет составил около 15% [2]. Получаемая низко кондиционная тепловая энергия в большей части (85%) используется на обогрев помещений. При этом весьма важным преимуществом работы аккумулирующей геосистемы является экономия ископаемых топлив и сокращение эмиссии углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Так, если ежегодное использование геотермальной энергии в мире (28000 ТДж) сравнить с производством такого количества энергии на станциях, применяющих углеводородное топливо, то экономия составит 15,4 млн. баррелей нефти, что исключит выброс в атмосферу 7 млн. тонн  $\text{CO}_2$ .

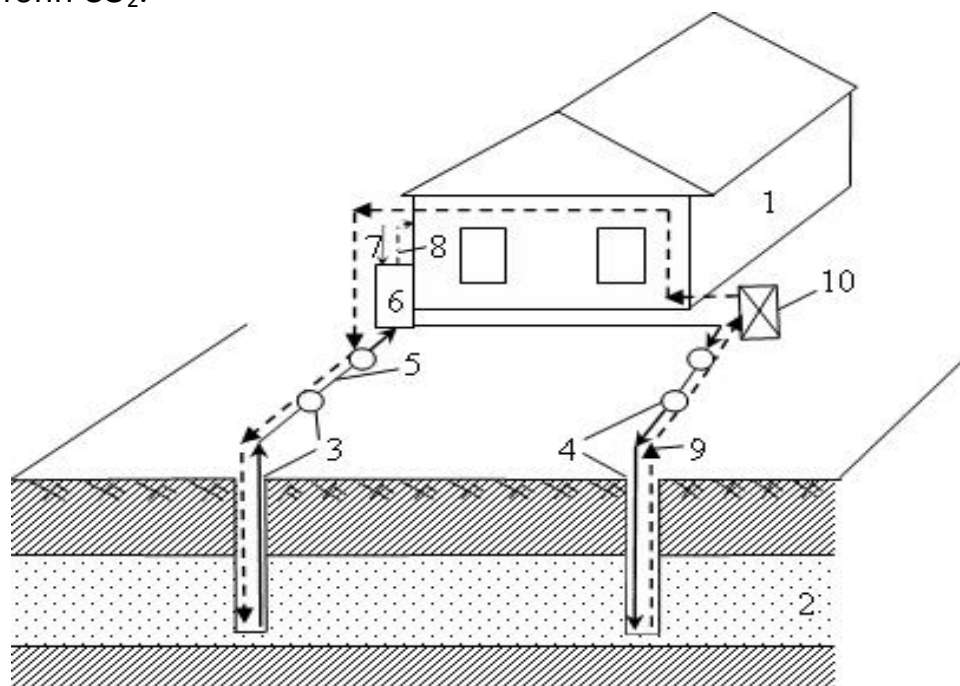


Рисунок 1 – Схема тепло- и холодоснабжения зданий с помощью системы подземного аккумулирования тепловой энергии: 1 – здание; 2 – водоносный коллектор; 3, 4 – соответственно "холодные" и "теплые" скважины; 5 – путь движения воды из холодной скважины летом; 6 – система кондиционирования воздуха; 7, 8 – наружный и охлажденный воздух соответственно; 9 – путь движения воды из теплой скважины зимой; 10 – тепловой насос

**Цель работы.** Эффективность создания и эксплуатации станций подземного аккумулирования напрямую зависит от соотношения ее технологических и термодинамических параметров с горно-геологическими условиями и энергетическими нагрузками потребителей. В связи с этим, целью данной работы является установление пространственно-временной динамики формирования термальных ореолов в водоносном пласте для обоснования технологических мер по отбору тепловой энергии, что позволит минимизировать и синхронизировать потребление природных энергоносителей жилыми микрорайонами. Для этого необходимо решение следующих задач: 1) на основе анализа климатических условий определить изменение потребления тепла коммунальным сектором в течение года; 2) выполнить моделирование термогидродинамических процессов в водоносном коллекторе, используемом в качестве хранилища тепловой энергии; 3) определить энергетическую мощность и экономию энергоресурсов при использовании подземных вод для тепло- и холодоснабжения зданий микрорайона.

**Материал и результаты исследований.** Динамика теплотребления зданий и помещений в первую очередь зависит от температуры наружного воздуха. Согласно нормативным документам [3] отопление гражданских и промышленных объектов должно начинаться при устоявшейся в течение нескольких дней температуре воздуха меньше  $8^{\circ}\text{C}$ , а охлаждение (кондиционирование) – при температуре более  $25^{\circ}\text{C}$ . В табл. 1 приведены климатические условия Западного Донбасса, анализ которых показывает, что отопительный период на данной территории длится с ноября по март, а охлаждающий – с июня по август.

Таблица 1 – Средняя температура и относительная влажность воздуха на территории Западного Донбасса

Показатели	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$t, ^{\circ}\text{C}$	6,1	-4,8	0,4	9,3	15,5	26,1	27,9	26,8	14,9	8,1	2,0	-2,6
$\psi, \%$	86	84	81	67	61	64	62	60	65	75	87	90

Количество тепла, необходимое для обогрева жилых зданий в отопительный период, определяется из выражения [4]

$$Q_{отоп} = q_0 \cdot k_c \cdot V \cdot (t_n - t_n), \quad (1)$$

где  $q_0$  – средние удельные отопительные характеристики сооружения;  $k_c$  – коэффициент, учитывающий зависимость расхода тепла от рода и вида системы отопления;  $V$  – обогреваемый объем здания;  $t_n, t_n$  – соответственно температура в помещении и наружного воздуха.

Общий расход воды на отопление и горячее водоснабжение зданий находится по соотношению

$$q_{\text{общ.вод.}} = 5 \cdot q' \cdot \alpha, \quad (2)$$

где  $q'$  – расход воды, величина которого согласно [4] для жилых зданий квартирного типа с централизованным горячим водоснабжением принимается равным  $17,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;  $\alpha$  – коэффициент, определяемый в зависимости от произведения общего количества водоразборных приборов на расчетном участке сети  $N$  и вероятности их действия в жилых зданиях  $P$

$$P = \frac{q' \cdot U}{q'' \cdot N'}$$

$q''$  – нормативный расход воды одним потребителем в час наибольшего водопотребления;  $U$  – количество жителей в зданиях.

Количество воды, расходуемое на горячее водоснабжение, будет равно

$$q_{\text{гор.вод.}} = q''' \cdot U, \quad (3)$$

$q'''$  – средний расход горячей воды одним потребителем в сутки.

Тепловой поток на нужды горячего водоснабжения определяется по соотношению

$$Q_{\text{гор.вод.}} = c \cdot q_{\text{гор.вод.}} \cdot (t_{\text{гор.вод.}} - t_{\text{холод.}}), \quad (4)$$

где  $c$  – объемная теплоемкость воды;  $t_{\text{гор.вод.}}$ ,  $t_{\text{холод.}}$  – соответственно температура горячей и холодной воды.

Анализ табл. 1 показывает, что теплый период года является менее энергоемким, чем холодный, в виду меньшей разности температур внутреннего и наружного воздуха. Однако значительный избыток тепла в зданиях и более высокая стоимость охлаждения воздуха, приводит к необходимости снижения затрат энергии на кондиционирование помещений. Мировой научно-практический опыт [5] показывает, что перспективным способом климатизации инженерных сооружений является использование оросительных форсуночных камер, в которых воздух обрабатывается непосредственным контактом с водой. Если температура воды будет ниже температуры воздуха, но выше температуры точки росы, то температура воздуха будет понижаться. При этом, вследствие испарения влагосодержание воздуха будет увеличиваться, а энтальпия – уменьшаться. Уменьшение энтальпии объясняется тем, что количество скрытого тепла, поступающего в воздух с водяными парами, будет меньше, чем количество явного тепла, отданного воздухом при контакте с водой на повышение её температуры. Холодопроизводительность такой системы можно определить из выражения

$$Q_{\text{холод.}} = q_{\text{возд.}} \cdot (h_2 - h_1),$$

$$h = c_{\text{возд.}} \cdot t_{\text{возд.}} + (Q_0 + c_{\text{вод.пар.}}) \cdot d, \quad d = \frac{\Psi}{100} \cdot d_n, \quad (5)$$

где  $q_{\text{возд.}}$ ,  $t_{\text{возд.}}$  – расход и температура воздуха;  $h_1$ ,  $h_2$  – соответственно энтальпия внутреннего и наружного воздуха;  $c_{\text{возд.}}$ ,  $c_{\text{вод.пар.}}$  – удельная теплоемкость воздуха и водяного пара соответственно;  $Q_0$  – скрытая теплота испарения 1 кг воды при температуре нуль градусов;  $d$ ,  $d_n$ ,  $\Psi$  – влагосодержание, влагоемкость и относительная влажность воздуха.

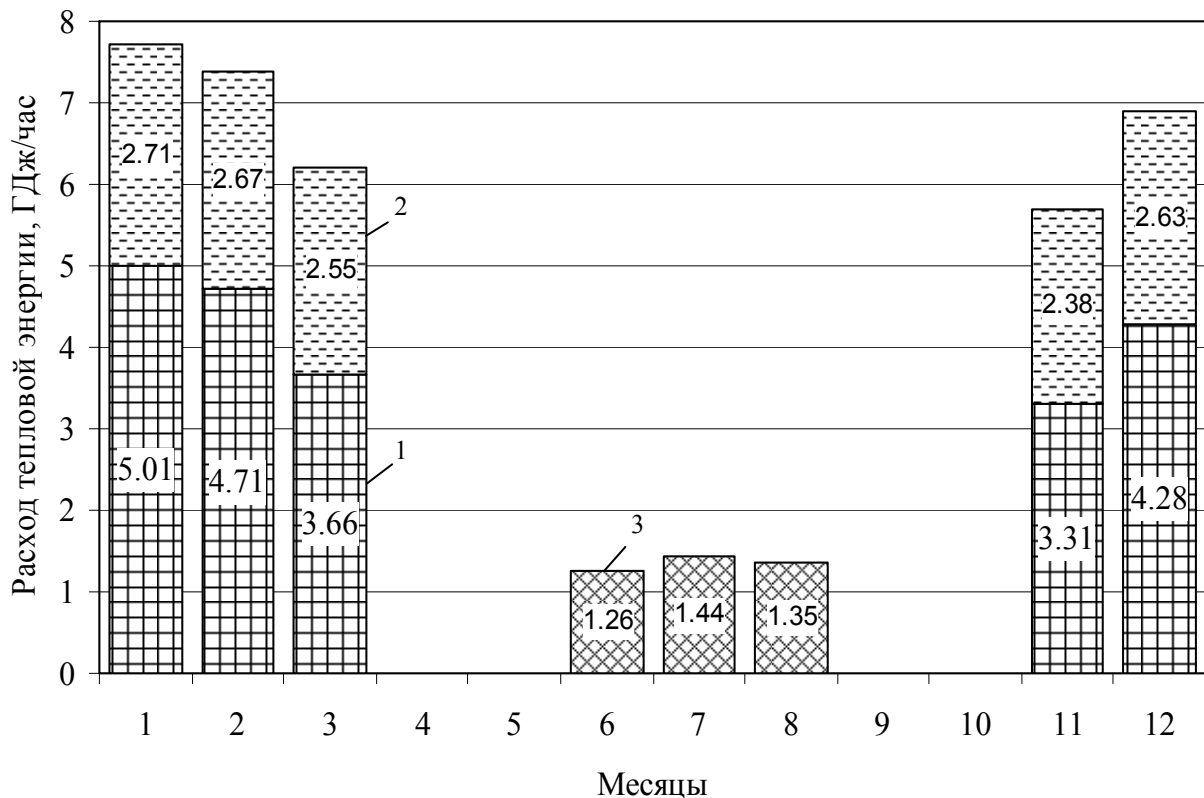


Рисунок 2 – Годовая динамика теплотребления жилого микрорайона в Западном Донбассе: 1, 2, 3 – соответственно расход тепловой энергии на отопление, горячее водоснабжение и кондиционирование зданий

На рис. 2 показана динамика теплотребления жилого микрорайона в течение года. При построении диаграммы параметры наружного воздуха принимались согласно табл. 1, а жилищно-коммунальные характеристики задавались следующими:  $U = 3000$  чел;  $V = 150000 \text{ м}^3$  (согласно нормам площади на 1 чел.);  $q_0 = 1254 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{час} \cdot \text{°C}$ ;  $\kappa_c = 1,15$ ;  $t_n = 18 \text{ °C}$ ;  $N = 100$ ;  $P = 0,33$ ;  $q''' = 0,0033 \text{ м}^3/\text{час}$ ;  $c = 4,183 \text{ МДж/м}^3 \cdot \text{°C}$ ;  $t_{\text{гор.вод.}}$  – задавалась в зависимости от температуры наружного воздуха [1];  $t_{\text{холод.}} = 5 \text{ °C}$ ;  $q_{\text{возд.}} = 75000 \text{ м}^3/\text{час}$  (согласно нормативу [3]  $25 \text{ м}^3/\text{час}$  на 1 чел.);  $h_1 =$

46 кДж/кг (энтальпия при климате, который необходимо поддерживать в помещениях в теплое время года [4]:  $t_n = 23^{\circ}\text{C}$  и  $\psi = 50\%$ );  $Q_0 = 2500$  кДж/кг;  $c_{\text{возд}} = 1,006$  кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $c_{\text{вод.пар}} = 1,86$  кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ .

Анализ диаграммы показывает, что большая часть тепловой энергии расходуется на отопление и горячее водоснабжение помещений (82 %), в то время как расход энергии на холодоснабжение составляет 18 %. Соотношение тепловых потоков идущих на подготовку горячей воды и обогрев зданий изменяется в диапазоне от 0,55 до 0,71, что позволяет производить подачу и подогрев теплоносителей для нужд отопления и водоснабжения последовательно [4].

В соответствии с динамикой потребления тепла жилым микрорайоном система подземного аккумулирования принимается состоящей из трех "теплых" и трех "холодных" скважин. Суммарный расход воды по всем скважинам определяется конкретными гидрогеологическими условиями. Для проведения тестовых расчетов был рассмотрен участок вблизи Левенцовской площади на территории Западного Донбасса [6]. Данные о годовых дебитах скважин приведены в табл. 2, знаки "+" соответствуют закачке воды в пласт-коллектор, а "-" – ее отбору.

Моделирование фильтрации и теплопереноса в водоносном горизонте при закачке и отборе теплоносителей в течение трех лет было выполнено с помощью программы ModFlow 2009 (Schlumberger W.S.). Для решения поставленной задачи использовалась разработанная и протестированная в [7] численная модель с нестационарными источниками воды и тепла, позволяющая описывать переходные режимы теплопереноса. В данной работе дополнительно учитывается произвольное расположение нескольких скважин, различная температура закачиваемой и отбираемой воды, неоднородная структура и переменная мощность водоносного коллектора.

Таблица 2 – Годовой цикл суммарного расхода теплоносителя по скважинам системы подземного аккумулирования тепловой энергии

Скважины	Расход теплоносителя по месяцам, м <sup>3</sup> /сут											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Отопление						Простой		Кондиционирование			Простой
"Холодные"	+600	+600	+600	+600	+600	-	-	-1000	-1000	-1000	-	-
"Теплые"	-600	-600	-600	-600	-600	-	-	+1000	+1000	+1000	-	-

Расстояние между скважинами определялось путем варьирования параметров модели. Чрезмерное сближение скважин приводит к взаимодействию "теплых" и "холодных" температурных ореолов в водоносном горизонте, а удаление – к увеличению длины трубопро-

водов и росту теплопотерь, изменяющихся от 35 до 140 кДж на один погонный метр. Начальная температура пласта-коллектора определялась из выражения

$$T = T_0 + \Gamma(H - H_0), \quad (6)$$

где  $T_0$ ,  $H_0$  – соответственно температура и глубина залегания нейтрального слоя;  $\Gamma$  – геотермический градиент;  $H$  – глубина залегания водоносного пласта.

Температура воды, нагнетаемой в "теплые" скважины принималась равной 25 °С, в "холодные" – 6 °С. Глубина залегания и средняя мощность пласта задавалась 300 и 20 м соответственно, гидравлический уклон 0,004, упругоёмкость 0,0001, пористость 0,2 [6]. Геотермический градиент для условий Донбасса 0,02 °С/м. Температура нейтрального слоя определялась из табл. 1 как среднегодовая, при этом глубина его залегания задавалась равной 10 м.

**Результаты моделирования.** На рис. 3 показана термогидродинамическая карта участка системы подземного аккумулирования тепловой энергии для двух периодов времени. Первый момент времени (670 сут) соответствует концу летнего периода и охлаждения зданий микрорайона на втором году работы системы. Следующий момент времени (883 сут) приходится на завершение отопления зданий в третьем году.

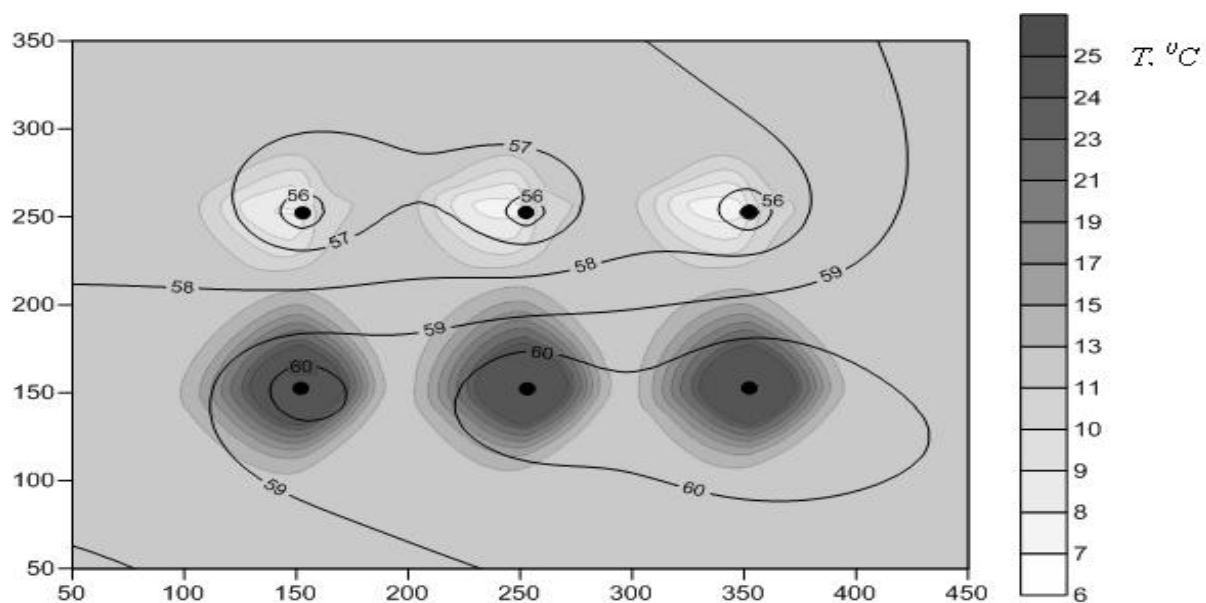
Анализ рис. 3 позволяет количественно оценить длительность формирования и размеры температурных зон в подземных водах в процессе закачки и отбора теплоносителя из водоносного пласта. Согласно расчетам, в данных горно-геологических условиях при расстоянии между "теплыми" и "холодными" скважинами более 100 м, к моментам завершения отопления и охлаждения зданий взаимодействие термальных ореолов в пласте происходить не будет. Сближение скважин приводит к слиянию их температурных фронтов, а следовательно к потерям тепловой энергии. Повышение и понижение уровня подземных вод в скважинах в среднем составляет три метра, и не превышает допустимых значений (кровли и половины мощности водоносного горизонта). Несимметричность температурных зон и уровней подземных вод на карте объясняется западным направлением естественного потока подземных вод в Левенцовкой структуре.

На рис. 4 отражено изменение температуры подземных вод в скважинах на протяжении всего периода эксплуатации системы. Теплопроизводительность скважин определялась из выражения [1]

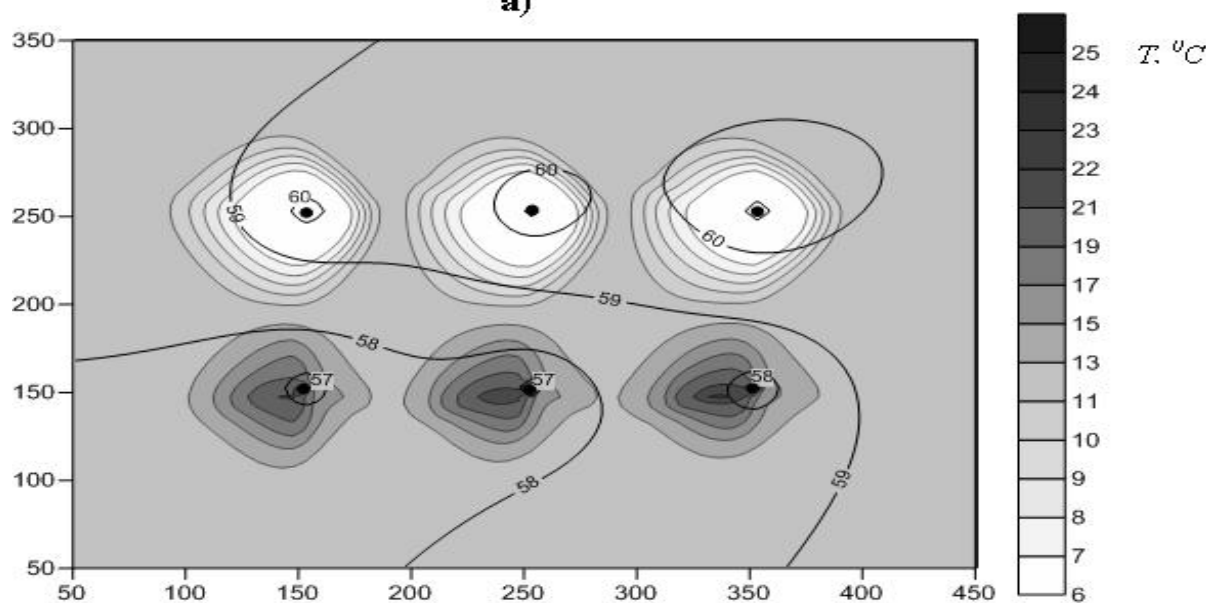
$$Q_{скв} = c \cdot q_{скв} (t_{ност} - t_{отп}), \quad (7)$$



где  $q_{скв}$  – дебит скважины;  $t_{пост}$ ,  $t_{отр}$  – температура поступающей и отработанной воды соответственно.



а)



б)

Рисунок 3 – Распределение уровня подземных вод (изолинии) и их температуры (оттенки серого цвета) на прямоугольном участке (размеры в плане даны в метрах) системы подземного аккумулирования тепловой энергии: а) – окончание периода охлаждения на втором году эксплуатации,  $t = 670$  сут; б) – конец периода отопления в третьем году,  $t = 883$  сут. Черными кругами показаны скважины

Анализ рис. 4 показывает, что температура теплоносителей в периоды простоя системы практически не изменяется, однако в период

отбора в "теплой" скважине она уменьшится на 20 %, и к его окончанию снижается до 21 °С. В "холодной" скважине вода нагревается менее интенсивно, к завершению отбора температура в ней поднимется до 9 °С. На основе полученных данных о температуре отбираемых теплоносителей выполнены расчеты тепло- и холодопроизводительности системы подземного аккумулирования тепловой энергии (рис. 5). Для сравнения, на диаграмме показано количество энергии необходимое для покрытия тепловых нагрузок возникающих в жилом микрорайоне в периоды отопления и охлаждения зданий.

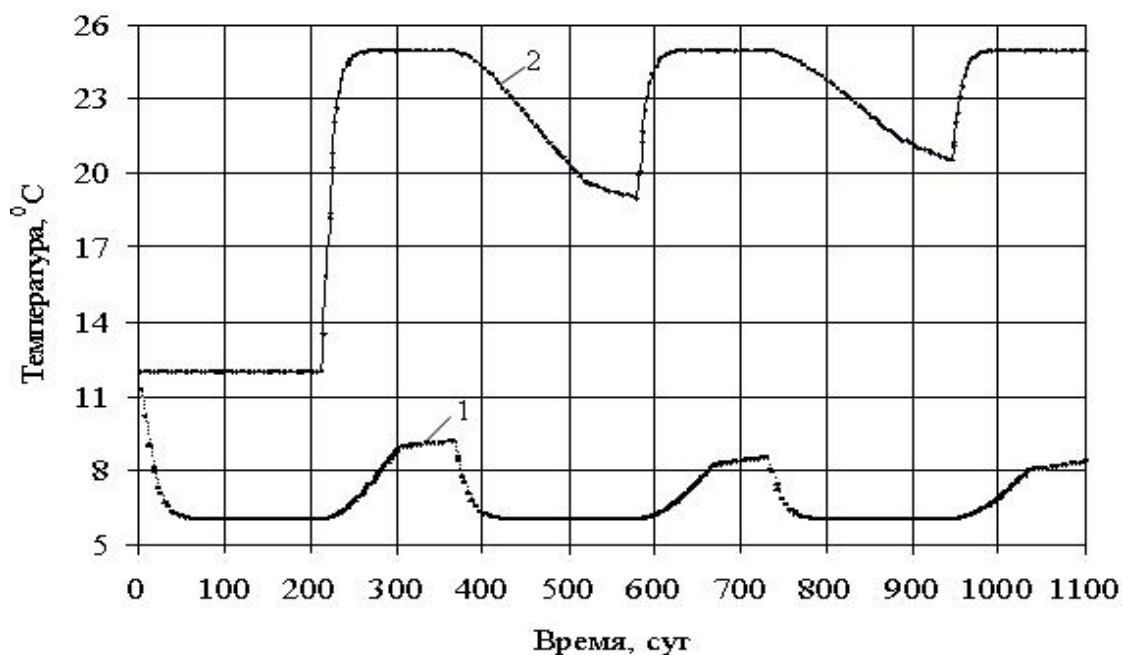


Рисунок 4 – Изменение температуры воды в скважинах системы подземного аккумулирования тепловой энергии:  
1, 2 – соответственно изменение температуры вблизи "холодных" и "теплых" скважин

Соотношение параметров на рис. 5 показывает, что системы аккумулирования в первый отопительный период покрывают в среднем 18 % возникающих в микрорайоне тепловых нагрузок. На третий год работы системы, эта величина увеличивается до 20 %. При этом, температура добываемых теплоносителей не достигает нормативных требований (50-60 °С) предъявляемых для теплоснабжения зданий [1]. Это компенсируется их дополнительным нагревом в тепловых насосах или котельных, что сопряжено с дополнительным расходом энергии и углеводородных продуктов. Альтернативным источником подогрева используемых теплоносителей является разработка остаточного топливного ресурса. Для условий Левенцовской структу-

ры это можно осуществить повышением температуры аккумулируемых в пласте-коллекторе вод путем подземного сжигания залегающих в его подошве маломощных и некондиционных угольных пластов. Применение этой геотехнологии избавит от необходимости подготовки теплоносителей на поверхности, сократит воздействие на окружающую среду, хотя и требует дальнейшего обоснования путем моделирования газогидродинамических процессов в водоносных горизонтах на различных стадиях эксплуатации подземного теплогенератора.

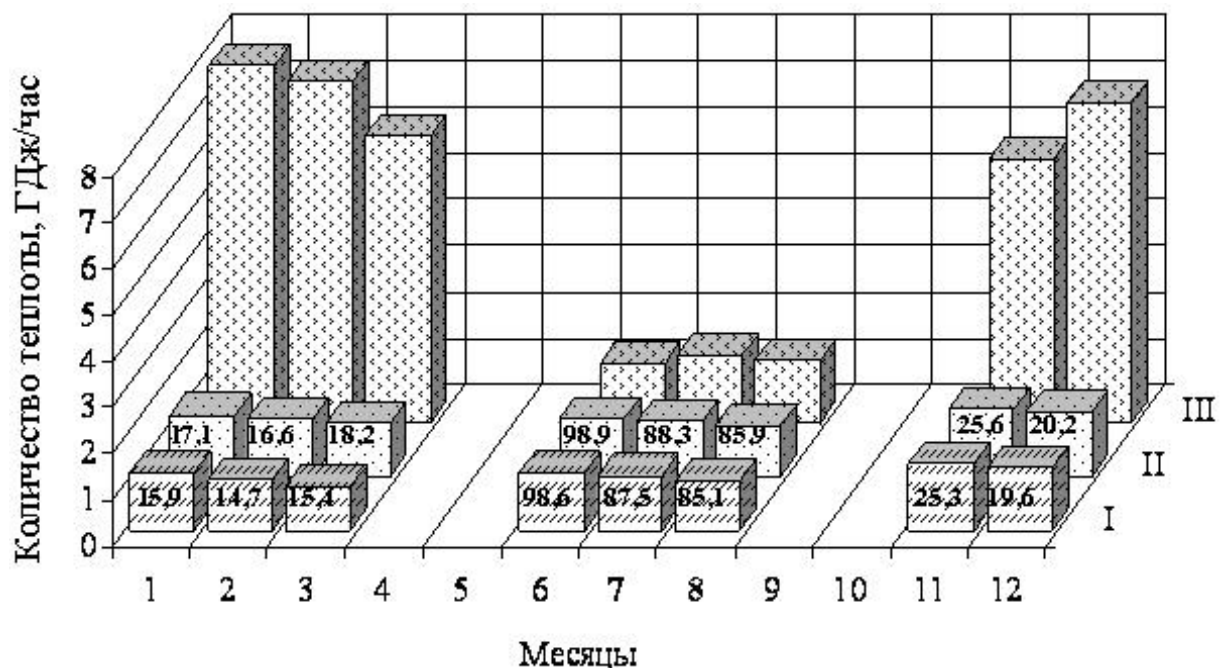


Рисунок 5 – Динамика производства и потребления тепловой энергии: I, II – теплопроизводительность системы подземного аккумулирования на втором и третьем году работы соответственно; III – теплотребление жилого микрорайона. Цифры – доля тепловой энергии от необходимой микрорайону, которую вырабатывает станция (в %)

В период охлаждения применение систем подземного аккумулирования совместно с оросительными форсуночными камерами покрывает более 90% возникающих в микрорайоне тепловых нагрузок, что позволяет производить кондиционирование зданий с минимальными затратами энергии.

**Выводы.** На основе анализа климатических условий Западного Донбасса определены тепловые нагрузки, возникающие при отоплении и охлаждении зданий жилого микрорайона в течение года. Для их минимизации обоснован метод подземного аккумулирования

тепловой энергии в водоносных коллекторах Левенцовской площади. Моделирование теплопереноса и фильтрации, при закачке и отборе теплоносителей позволило установить оптимальное расположение эксплуатационных скважин, исключая отрицательное взаимовлияние температурных ореолов и сокращающие теплопотери в трубопроводах.

Расчеты теплового баланса показали, что системы подземного аккумулирования в данных условиях позволяют покрывать 20 % затрат энергии, в отопительный период, и 90 % затрат – в охлаждающий. Повышение эффективности теплоснабжения зданий и дальнейшее развитие данной работы целесообразно путем разработки и обоснования технологии подземного сжигания угольных пластов для дополнительного нагрева теплоносителей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология: Учеб. пособие / Аренс В.Ж. – М: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 656 с.
2. Энциклопедия газовой промышленности. 4-е изд. Пер. с франц.: Ред. пер. К.С. Басниев. – М.: Акционерное общество «Твант», 1994. – 884 с.
3. Русланов Г.В. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий: Проектирование: Справочник / Г.В. Русланов, М.Я. Розкин, Э.Л. Ямпольский. – К.: Будівельник, 1983. – 272 с.
4. Тихомиров А.К. Горячее водоснабжение жилого микрорайона: [учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности "теплогазоснабжение и вентиляция"] / А.К. Тихомиров. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2006. – 109 с.
5. Габриель И. Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома / И. Габриель, Х. Ладенер. – С.: "БХВ-Петербург", 2011. – 478 с.
6. Отчет о поисках и оценке коллекторов для захоронения минерализованных шахтных вод Западного Донбасса (Левенцовская и Северо-Орельская площади) / О.А. Горобец, С.З. Держак, Б.Б. Чемерис. – Павлоград: Павлоградская ГРЭ, ПГО "Донбассгеология", МУП УССР, 1985. – 219 с.
7. Рудаков Д.В. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии // Д.В. Рудаков, И.А. Садовенко, А.В. Инкин // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 25-29.