

тепла с выработкой дополнительной электроэнергии. Это особенно важно при работе комплекса в летний период.

Библиографический список

1. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных энергетических комплексов / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис. – К.: Наукова думка, 2006. – 176 с.
2. Зысин В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы. – М.: Наука, 1962. – 187 с.
3. Вскипающие адиабатные потоки / В.А. Зысин, Г.И. Баранов, Г.И. Барилевич, Т.Н. Парфёнова. – М.: Атомиздат, 1976. – 152 с.
4. Російсько-українсько-англійський словник з механіки / Укладачі В.М. Бастун, Я.М. Григоренко, В.А. Широков. – К.: Наукова думка, 2008. – 512 с.

5. Экспериментальное исследование расширяющихся сопел, работающих на сильно недогретой воде / А.С. Голдин, О.О. Мильман // Теплоэнергетика. – 2003. – № 3. – С. 70-73.

6. Абрамович Г.Н Газовая динамика воздушно-реактивных двигателей. – М.: Изд-во БНТ, 1947. – 198 с.

7. Пат. 90232 Украина UA МПК⁹ F01D 1/00. Реактивная турбина / Булат А.Ф., Чемерис И.Ф.; заяв. та патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – № а 200906198; заявл. 15.06.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7.

Поступила 27.09.2013

УДК 622.233: 551.49

Кожевников А.А. /д.т.н./, Судаков А.К. /к.т.н./
ГВУЗ «НГУ»

Дреус А.Ю. /к.т.н./, Лысенко Е.Е.
ДНУ им. Олеса Гончара

Наука

Исследование теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде криогенно–гравийного фильтра

Представлены результаты теоретических исследований теплопереноса в криогенно–гравийном элементе фильтра, изготовленном по низкотемпературной технологии. Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоперенос, низкотемпературная технология, криогенно–гравийный фильтр

The results of theoretical and laboratory studies of heat transfer in the element of the cryogenic gravel puck, that produced by low-temperature technology, are present.

Keywords: mathematical modeling, heat transfer, cryogenic technology, cryogenic-gravel filter.

Введение

В настоящее время существует устойчивая тенденция к увеличению объемов потребления питьевой воды. Неудовлетворительное качество поверхностных вод обуславливает все большее использование подземных, при этом для получения более качественной воды требуется оборудование все более глубоких скважин, оснащенных надежными и эффективными фильтрами. Существующие технологии создания гравийных фильтров имеют массу недостатков и не удовлетворяют технологическим, техническим, экономическим и экологическим требованиям. В Национальном горном университете была предложена [1] новая технология изготовления опускных гравийных фильтров блочной конструкции, по которой омоноличивание композита, состоящего из гравия и вяжущего вещества на водяной основе, достигается путем его замораживания. После установки фильтра в рабочее положение конструкция приобретает необходимые фильтрационные свойства, за счет обратного фазового перехода вяжущего вещества.

Для определения рациональных параметров низкотемпературной технологии изготовления таких фильтров предложено использовать как экспериментальные методы в лабораторных условиях, так и методы математического моделирования [1, 2]. Следует заметить, что технология оборудования буровой скважины низкотемпературными гравийными фильтрами предполагает ряд технологических операций, относящихся к подготовительному и основному периодам. В подготовительный период осуществляют извлечение готовых элементов фильтра из форм, сборку фильтра на дневной поверхности, операции по подготовке фильтра к транспортировке по стволу скважины. В основной период – выполняют наращивание буровой (фильтровой) колонны, транспортировку на колонне фильтра по стволу скважины, посадку фильтра в водоприемную часть скважины.

Отметим, что если продолжительность подготовительного периода будет достаточно большая, то может произойти преждевременное «растепление» и потеря прочности конструкции фильтра. Оценка

«жизнеспособности» омоноличенного элемента низкотемпературного фильтра осуществляется путем определения времени, в течение которого конструкция находится в замороженном состоянии, т.е. до начала фазового перехода вяжущего вещества.

Цель работы - исследование процесса теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде замороженного гравийного фильтра, находящегося в условиях конвективного теплообмена с воздушной средой, с использованием методов математического моделирования.

Постановка задачи

Элемент фильтра представляет собой многофазную и многокомпонентную систему, которая состоит из гравия – минеральная составляющая и воды или водяного раствора – дисперсная среда. Общий вид омоноличенного элемента гравийного фильтра представлен на рис. 1а. В качестве расчетной области (рис. 1б) выбрано цилиндрическую стенку с внутренним R_1 и внешним R_2 радиусами, высотой H . Для проверки результатов математического моделирования проводились определение температуры композита фильтра в лабораторных условиях. Пять контрольных точек, в которых проводилось измерение температуры, обозначены на рис. 1б соответствующими номерами.

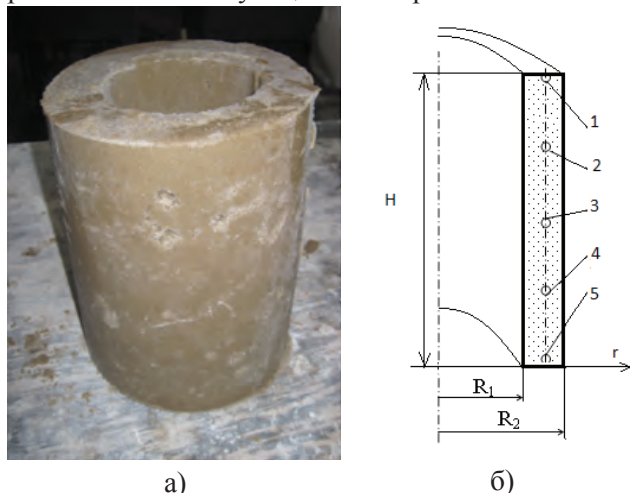


Рис. 1. Общий вид готового блока фильтра (а), схема расчетной области (б)

Во время подготовительных работ КГЭ фильтра находится в условиях свободной или смешанной конвекции. Примем допущение, что влияние вынужденной конвекции во время подготовительных операций незначительно, тогда для свободной конвекции теплоотдача к боковой поверхности фильтра будет описываться критериальным уравнением [3]

$$Nu_{\infty} = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr_{\infty})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{\infty}}{Pr_s} \right)^{0,25},$$

где Gr - критерии Грасгофа; Pr_{∞} , Pr_s - критерии Прандтля, вычисленные при температуре воздуха и стенки фильтра соответственно.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{\infty} - T_s) \cdot H^3}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{a}{\nu}$$

где g - ускорение свободного падения, β - коэффициент теплового расширения воздуха, T_{∞} - тем-

пература воздуха, T_s - температура поверхности фильтра, ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, a - коэффициент температуропроводности воздуха.

Из определения критерия Нуссельта, средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ вычисляется

$$\bar{\alpha} = \frac{Nu_{\infty} \cdot \lambda_{\infty}}{2 R_2},$$

где λ_{∞} - коэффициент теплопроводности воздуха при температуре T_{∞} .

Для определения допустимого времени нахождения фильтра на дневной поверхности, используем дифференциальное уравнение теплопереноса [3, 4]

$$c_{ef}(T) \rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\tau > 0, R_1 < r < R_2, 0 < z < H,$$

где c_{ef} - коэффициент эффективной теплоемкости; τ - время; T - температура; ρ - плотность; λ - коэффициент теплопроводности.

Начальные и граничные условия для уравнения (1) имеют вид

$$\begin{aligned} T|_{\tau=0} &= T_0, \\ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s &= \bar{\alpha} (T|_s - T_{\infty}), \end{aligned} \quad (2)$$

где T_0 - температура фильтра после извлечения из морозильной камеры.

Уравнение (1) описывает процесс теплопереноса в фильтре как в замороженном, так и в растепленном состоянии. Учет фазового превращения выполняется путем введения соответствующим образом функций теплофизических коэффициентов [5]

$$\begin{aligned} c_{ef}(T) &= (1 - \Pi) \cdot c_{sk} + \Pi \cdot i(T) \cdot U_0 \cdot c_l + \\ &+ \Pi \cdot (1 - i(T)) \cdot U_0 \cdot c_i + \frac{\rho_l}{\rho} \cdot \Pi \cdot l \cdot \frac{di}{dT}, \end{aligned}$$

где Π - пористость; U_0 - влагосодержание; c_{sk} , c_p , c_l - теплоемкости гравия, льда и воды, соответственно; $\rho_l(T)$ - плотность льда, l - теплота фазового перехода «лед-вода».

Коэффициент теплопроводности дисперсионной среды

$$\lambda = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)(1 - i(T)),$$

где λ_1 и λ_2 - коэффициенты теплопроводности мерзлой и талой фаз определяются следующими выражениями [5]:

$$\lambda_1 = 1,7(\rho \cdot 10^{-3} + 0,1U_0 - 1,1) - 0,1U_0,$$

$$\lambda_2 = 1,5(\rho \cdot 10^{-3} + 0,1U_0 - 1,1) - 0,1U_0.$$

Функция льдистости $i(T)$, учитывающая наличие зоны фазового перехода задается выражением вида [6]

$$i(T) = i_k \frac{1 - e^{-m(T - T_H)}}{1 - e^{-m(T_K - T_H)}},$$

где i_k - значение льдистости при температуре

T_K ; T_H , T_K – температуры начала и конца фазового перехода соответственно; m – эмпирический коэффициент, зависящий от дисперсности и структурного состава пористого материала.

Результаты расчета и их обсуждение

Для решения задачи (1)-(2) была использована численная схема расчета на основе метода конечных разностей. В расчетах начальная температура образца принята равной температуры морозильной камеры $T_0 = -20$ °C, температура воздуха принята $T_\infty = +25$ °C. Результаты численного решения задачи растепления представлены на рис. 2.

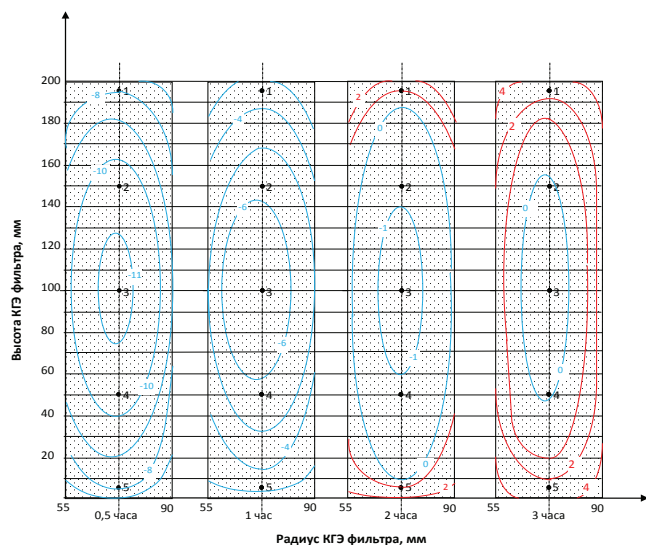


Рис. 2. Температурные поля в фильтре при его растеплении в воздушной среде: – контрольные точки

Представленные результаты показывают, что температурное поле конструкции неоднородно и, при заданных условиях, через 2 ч после извлечения элемента фильтра из морозильной камеры торцевые поверхности нагреются выше температуры фазового перехода.

На продолжительность подготовительных операций существенное влияние оказывает температура воздушной среды. В зимний период (таблица) среднемесячная температура на большинстве территории Украины составляет -2,6 °C, а в ее южных регионах +0,9 °C. В целом по всей территории в весенне-осенний период температура составляет +9,3 °C, а в летний +20,2 °C. Среднегодовая температура +9,2 °C [7].

С учетом результатов численного решения задачи был выполнен расчет продолжительности времени

Таблица. Средняя температура окружающей среды в регионах Украины

Регион	Средняя температура, °C												
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Год
Ужгорода	-1,7	-0,1	5,0	11,0	16,1	18,8	20,9	20,3	15,5	10,3	4,7	-0,2	10,1
Львова	-2,9	-2	2,6	9,0	14,1	17,0	19,6	18,7	13,6	8,6	4,0	-1,4	8,4
Киева	-3,5	-3	1,8	9,3	15,5	18,5	20,5	19,7	14,2	8,4	1,9	-2,3	8,4
Днепропетровска	-3,7	-3,4	1,8	9,6	16,1	19,8	22,1	21,4	15,5	8,9	2,0	-2,3	9,0
Донецка	-4,1	-4,1	1,3	9,4	15,4	19,3	21,6	20,8	15,1	8,5	1,6	-2,9	8,5
Симферополя	0,2	0,4	3,9	9,9	15,1	19,5	22,3	22,0	16,9	11,3	5,8	2,0	10,8

растепления элемента фильтра в зависимости от величины начальной температуры образца (рис. 3).

Для проверки достоверности полученных расчетных данных, было выполнено их сопоставление с результатами экспериментальных измерений температуры термопарами в контрольных точках. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными в среднем по всем термопарам составило не более 5 %, максимальное отклонение между данными составило 15 %. На рис. 4. показано изменение температуры для контрольной точки № 3, которая менее всего подвержена погрешностям на границе.

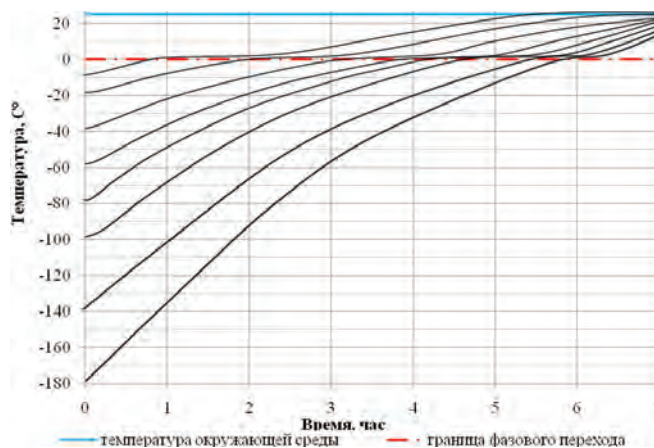


Рис. 3. Расчетное продолжительность времени фазового перехода элемента фильтра в зависимости от температуры нагрева контактной его поверхности

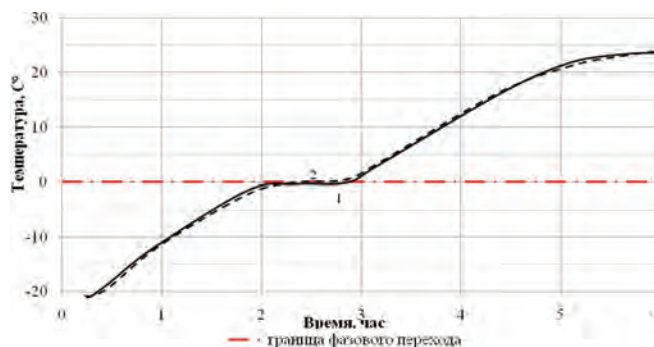


Рис. 4. Изменение температуры в контрольной точке № 3 в процессе его растепления в воздушной среде по данным: 1 – расчета, 2 – эксперимента

Качественное соответствие экспериментальной и расчетной кривых очевидно. В обоих случаях можно выделить три основных этапа: этап интенсивного нагрева до температуры фазового перехода, этап фазового перехода, на протяжении которого температура поддерживается приблизительно постоянной, и этап

прогрева образца до температуры окружающей среды.

Полученное расхождение является удовлетворительным и свидетельствует о возможности применения математической модели для исследования теплопереноса в гравийных фильтрах, изготовленных по низкотемпературной технологии.

Выводы

В результате исследования теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде гравийного элемента фильтра при его растеплении в воздушной среде установлено, что:

- разработанная математическая модель адекватна натурным условиям. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превысило 5 %, а максимальное отклонение 15 %, что свидетельствует о возможности применения разработанной математической модели для исследования процессов теплопереноса в пористой среде фильтров буровых скважин;

- разработанная математическая модель позволяет определить максимальное время выполнения вспомогательных операций по строительству гравийного фильтра в буровой скважине в зависимости от условий теплообмена.

Библиографический список

1. Сушко С.М., Бегун А.Д., Кожевников А.А., Судаков А.К. Новая технология создания гравийных фильтров буровых скважин // Горный журнал Казах-

стана. – 2011. - № 10. - С 4-8.

2. Определение временных параметров замораживания криогенно-гравийного фильтра / А.А. Кожевников, А.К. Судаков, Е.Е. Лысенко, А.Ю. Дреус // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Гірничо-геологічна». - 2012. - Вип. 16(206). - С. 20-23.

3. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

4. Беляев Н.М. Основы теплопередачи: Учебник. – К.: Вища школа, 1989. – 343 с.

5. Пермьяков П.П. Идентификация параметров математической модели теплового переноса в мерзлых грунтах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 86 с.

6. Поврезнюк Е.Б., Рядно А.А. Математическая модель промерзания (оттаивания) малопроницаемой водонасыщенной пористой среды, содержащей воздух // Вісник Дніпр. ун., серія Механіка, 1999, вип. 2, т. 1, С. 89–94.

7. http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%82_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D1%8B

Поступила 27.09.2013



Уважаемые читатели!

У Вас есть возможность оформить подписку изданий

ООО «Укрметаллургинформ «НТА» на 2014 г.:

Индекс: 74311

- журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» на русском языке;

Индекс: 49501

- журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность» на русском языке, CD-ROM;

через каталог «Изданий Украины», каталог России «Газеты. Журналы» и через редакцию журнала.

Редакция:

ул. Дзержинского, 23, г. Днепропетровск, Украина, 49027,
к/т 056-744-81-66; т/ф 0562-46-12-95.