

МОДЕЛИРАНЕ НА ТЕЧЕНИЕТО НА ВЪЗДУХ В ПОРЕСТА СРЕДА НА СКЛАД ЗА ВЪГЛИЩА

Михаил Михайлов, Александър Крилчев, Елена Власева

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; michaylov@mgu.bg, krilchev@mgu.bg, elena@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Складовете за въглища на открито често са съпроводени със samozапалвания в резултат от обтичането от вятъра и проникването на въздушни обеми във вътрешността. Статията представя изследване на поведението на потоците в порестата среда като естествено продължение на предишно изследване на обтичането на складовете [1]. Физическото моделиране е извършено на лабораторен стенд, с форма на пресечена пирамида в мащаб, съответстващ на реални складове за въглища. Измерени са наляганията по повърхността на склада и с тези данни е моделирано числено разпространението на въздушните течения във вътрешността със специализиран софтуер – Flex PDE. Предложено е уплътняване на порестата среда в купа с хидрогел за намаляване на просмукванията на въздух и са изследвани вискозното и инерционното съпротивление в новообразуваната структура (въглища-гел).

MODELING OF AIR LEAKAGES IN STOCKPILES' POROUS MEDIA

Mihael Michaylov, Alexander Krilchev, Elena Vlasseva

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. As a result of wind flow around stockpiles and further air leakages inside it very often selfheating and spontaneous combustion occur in stockpiles outdoors. This paper presents one research on air leakages behavior inside the stockpile porous media and is logical extension of previous research on air flows around it [1]. Physical modelling is performed on laboratory stand with a shape of truncated pyramid in scaled dimensions, reflected real stockpiles. Pressure on stockpile surface has been measured serving as a input data for numerical modeling of air leakages inside the stockpile. Numerical modeling is performed with Flex PDE software. Congestion with hydrogel has been proposed to restrict air leakages. Analysis of viscous and inertial resistance of thus formed coal-gel structure is presented here after.

Въведение

Самонагриването на склонни към samozапалване насипни материали в складове, силози и транспортни бункери създава опасности от материални и хуманни загуби. Течението на въздух в порестата среда доставя кислород за протичане на процеса на нискотемпературно окисление и самонагриване, при съществуващите влошени условия за разсейване на акумулираната топлина. Дебита на въздух и неговото разпределение в порестата матрица зависи от съпротивлението на матрицата и от разпределението на налягането по проницаемите граници.

Влиянието на скоростта на вятъра и формата на складове за въглища върху разпределението на налягането по порестата граница е описано в [1], на основата на физическо и математическо моделиране. На тази основа в статията се моделира двумерно течението на въздух в порестата среда на склад за въглища, като се уточняват експериментално зависимостите за определяне на загубата на налягане в порестата среда – въглища, с голяма степен на нееднородност.

Основни уравнения

Течението на въздух в порестата среда се описва с уравненията на Forchheimer[2,3] и уравнението на непрекъснатостта:

$$\frac{dP}{dx} = -\alpha \nu \rho \bar{u} - \beta \rho |\bar{u}| \bar{u} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dy} = -\alpha \nu \rho \bar{v} - \beta \rho |\bar{v}| \bar{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

където: $\alpha = \frac{1}{K}$ - коефициент на вискозно

съпротивление, m^{-2} (4)

$\beta = \frac{C_E}{\sqrt{K}}$ - коефициент на инерционно

съпротивление, m^{-1} (5)

K – проницаемост на порестата матрица, m^2 ;

C_E - коефициент на Ergun, силно зависим от режима на течение на флуида;

Проницаемостта на матрицата зависи от размера d на твърдите частици и пористостта ε . В изчисленията се ползват две зависимости [4,5] за изчисление на проницаемостта:

$$\Rightarrow \text{по Karman-Kozeny } K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{166(1-\varepsilon)^2} \quad (6a)$$

$$\Rightarrow \text{по Ergun } K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (6)$$

получени по емпиричен път, за еднородни частици (сфера). Проницаемостта се определя като частта на обема на празнините от общия обем на матрицата:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad \text{и още от зависимостта } \varepsilon + C \quad (7)$$

където: ρ_m и ρ_s са плътностите на проницаемата матрица и на твърдата фаза, kg/m^3 ;
 C – компактност на матрицата.

Коефициентът на Ergun в (5) обикновено се изчислява по емпиричната зависимост:

$$C_E = 1.75 \sqrt{\frac{\varepsilon^3}{150}} \quad (7a)$$

При решаване на стационарна (независима от времето и третата координата) филтрация, най-често се търси свеждане на уравненията на течението (1-3) до хармоничното уравнение на Лаплас. След диференциране на (1) и (2) и заместване в (3) се получава зависимост във вида:

$$\frac{1}{\alpha \nu} \left(\frac{1}{1 + \frac{\beta}{\alpha \nu} u} \times \frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{1}{1 + \frac{\beta}{\alpha \nu} v} \times \frac{d^2 P}{dy^2} \right) = 0 \quad (8)$$

в която на уточнение подлежат стойностите на коефициентите α и β и граничните условия.

Складовете за въглища, насипищата и скалните купове се отличават с голяма степен на нееднородност по размер и форма на насипвания материал, което прави некоректно прякото използване на емпиричните зависимости, получени за еднородна среда, при изчисляване на основните характеристики на порестата матрица. С това убеждение са проведени лабораторни изследвания, резултатите от които са представени в следващата част.

Лабораторни изследвания

Целта на изследванията е да се получат емпирични данни за влиянието на размера на частиците на насипния материал, с реална нееднородност и форма, и пористостта върху стойностите на α и β в (8).

Измерванията са извършени в два размера вертикални тръби с вътрешен диаметър 98 и 160 mm и дължина на участъка в който се измерва депресията за определяне градиента на налягането, съответно 1825 и 2700mm. В тях са проведени изследвания на три проби – от пясък и

въглища с различна едрина. В табл.1 е представен начинът за определяне на еквивалентния диаметър d_e , като за критерий е избрано отношението на омиваната повърхност към обема на частиците, както е показано в [6]. Стойността на еквивалентния диаметър се получава по зависимостта:

$$d_e = \frac{1}{\sum_i \left(\frac{\bar{m}_i}{d_i} \right)} \quad (9)$$

където: \bar{m}_i - масовият дял на i -тата фракция;

d_i - среден размер на фракцията, mm.

Таблица 1

Фракция [mm]		\bar{m}_i	\bar{m}_i / d_i [mm ⁻¹]
-80	+50	0.1907	0.002934
-50	+25	0.2130	0.005680
-25	+20	0.1378	0.006124
-20	+10	0.1488	0.009917
-10	+5	0.1262	0.016832
-5	+2.5	0.0831	0.022153
-2.5	+1	0.0701	0.040064
-1	+0	0.0303	0.060643
СУМА:		1.0000	0.103704
$d_e = 9.643 \text{ mm}$			

Пористостта ε на трите проби (табл.2) е определена по метода на насищане на празнините с течен парафин. Стойностите на а.т и б.г са получени от коефициентите на квадратичните корелационни уравнения (без свободен член) на кривите на фиг.1. Отношението l/l' в таблицата, представя колко пъти е удължен пътя на филтрация l' в сравнение с транспортното разстояние, за което се измерва загубата на налягане, изчислено по [7]. Пътя на филтрацията l' зависи от изменението на размера и геометрията на порите по протежението на траекторията на въздушното течение. Траекторията l' винаги е по-голяма от разстоянието l , т.е. $l/l' > 1$. Проницаемостта K представлява характеристика на порестата средата, която има физически смисъл на площ на филтрационните канали по които филтрат се движи. Коефициентът на филтрация K_f в една и съща среда зависи и от вида на флуида и неговата плътност, и се свързва с проницаемостта по уравнението:

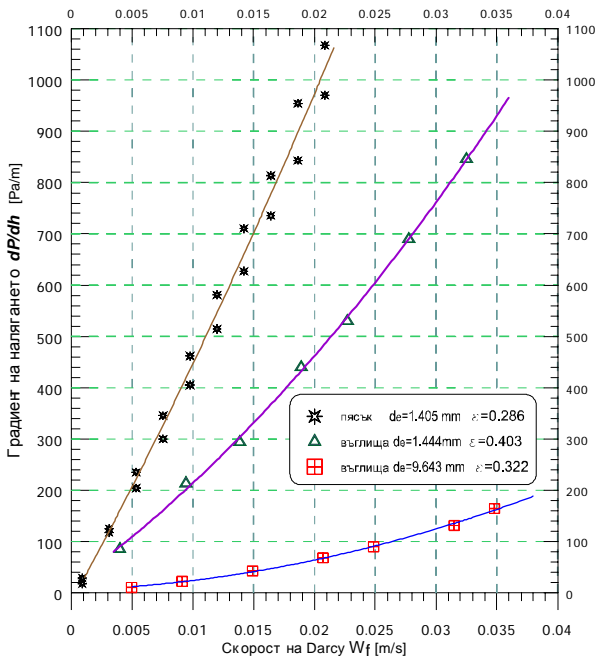
$$K_f = K \cdot \frac{\rho}{\mu} = \frac{K}{\nu} \quad \text{или} \quad K = \nu \cdot K_f$$

По абцисата на фиг.1 е нанесена средната скорост на въздуха при течение в празна тръба на същия зададен обемен дебит, който протича в порестата среда.

Сравнението на данните от опита за трите проби показва, че колкото по-голяма е нееднородността на средата, толкова по-големи са отклоненията от зависимостите 5-7, получени за среда с еднородни частици.

Таблица 2

наситен материал	de [mm]	e	a.m [Pa.s/m ²]	b.r [kg/m ⁴]	a [m ⁻²]	b [m ⁻¹]	C _E	l'/l	K [m ²]
пясък	1,405	0,286	8,406E+05	3,203E+04	2,053E+09	7,0642E+05	111,8	10,9	4,87E-10
въглища	1,444	0,403	1,902E+04	2,113E+05	1,219E+09	1,776E+05	28,1	6,5	8,2E-10
въглища	9,643	0,322	1,393E+03	9,220E+04	8,929E+07	7,748E+04	21,3	8,7	1,12E-08

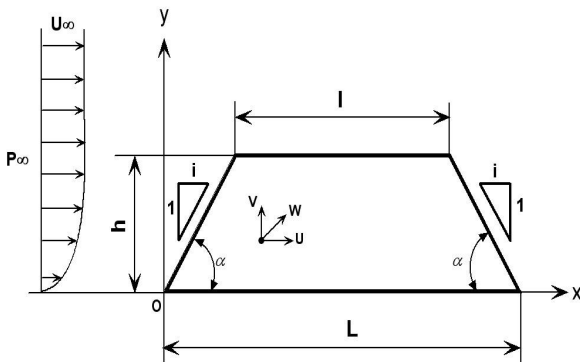


Фиг. 1.

При математическото моделиране на течението в склад за въглища са използвани получените стойности на коефициентите α и β (табл.1) за аеродинамично характеризирание на порестата среда.

Математическо моделиране

Решава се системата от диференциални уравнения 1-3 за течението на въздух в склад за въглища (фиг.2) при следните условия.



Фиг. 2.

Независими променливи в област D - x и y

$$D = [x \in (0 \div L); y \in (0 \div h)]$$

Зависими променливи: P(x;y), u(x;y), v(x;y),

Константи:

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ -плътност на въздушната среда в порите;

$\kappa [m^2]$ -проницаемост;

$\nu \left[\frac{m^2}{s} \right]$ -коефициент на кинематичен вискозитет.

Гранични условия:

Разпределението на налягането по порестата граница на склада се задава от опитните резултати в [1] за стойностите на коефициента на налягане C_P, дефиниран по известната зависимост:

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\rho_\infty \frac{U_\infty^2}{2}} = 1 - \left(\frac{u}{U_\infty} \right)^2 \tag{12}$$

в която с индекс "∞" са означени параметрите на несмутеното течение на вятъра.

След изразяване на налягането P от (12) и заместването му в (8) за разпределението на безразмерното налягане по проницаемите порести граници на склада за въглища се получава уравнението:

$$\frac{\rho_\infty U_\infty^2}{2\alpha\nu h^2} \left[\frac{\partial^2 C_P}{\partial \left(\frac{x}{h} \right)^2} * \frac{1}{1+b.u} + \frac{\partial^2 C_P}{\partial \left(\frac{y}{h} \right)^2} * \frac{1}{1+b.v} \right] = 0 \tag{13}$$

където: $b = \frac{\beta}{\alpha \cdot \nu}$; h – височина на склада, m.

Въздушното течение в порестата среда е моделирано със специализиран софтуер Flex PDE @ version 5, разработен от професор Gunnar Baskstrom от университета в Мальмо Швеция [8]. Flex PDE е софтуерен продукт с който се решават линейни и нелинейни диференциални уравнения по метода на крайните елементи. Уравненията, граничните условия, областта на изследване се задават с вграден в системата редактор.

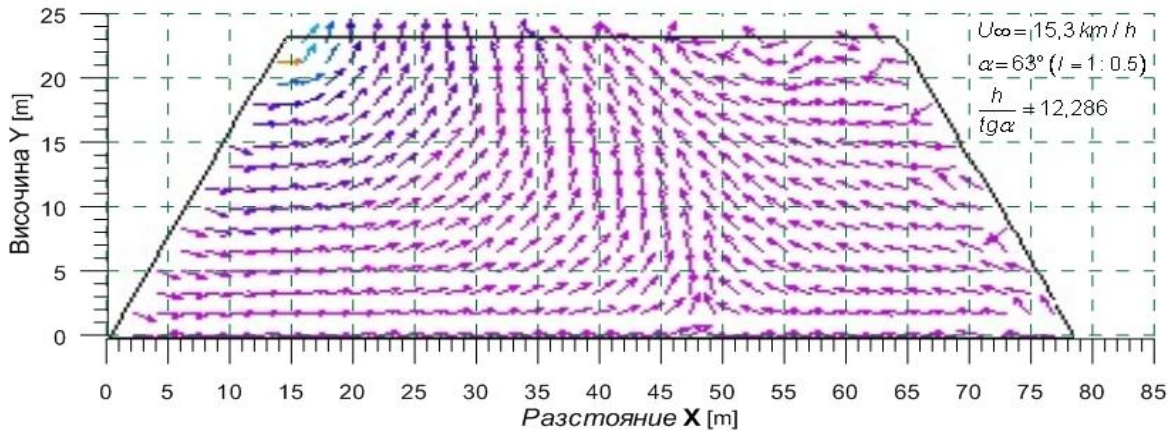
Векторните полета на скоростите за физически моделираните [1] условия на обтичане, са показани на фигури 3 и 4. Ясно се вижда, как с намаляване на височината и ъгъла на наклона на стените на склада се променя дълбочината на проникване на утечките на въздух, при съпоставими скорости на вятъра. При голяма височина на склада (фиг.3а и фиг.3б) може да се очаква опасност от самозапалване почти еднаква за наветрената и подветрената му страна. Този извод е направен на основата на сравнение на числените стойности на филтрационните скорости в близост до наклонените граници. Очевидно рециркуляционната зона зад пира-

мидата на склада подхранва достатъчно проникването на въздух в порестата среда през подветрената стена. За условията на моделирането височина от 15m е критична за създаване на благоприятни условия за окисление.

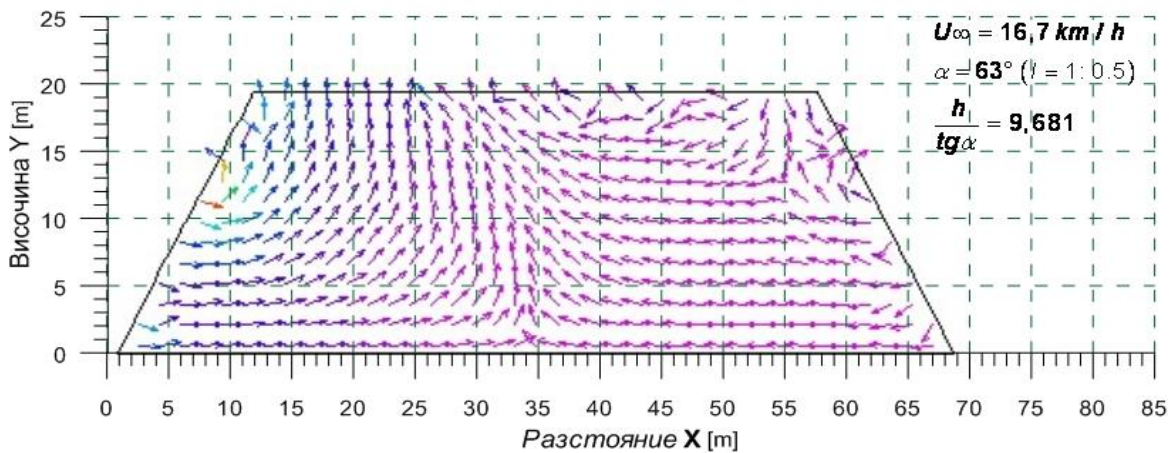
При по-големи височини се увеличават зоните с по-къса траектория на утечките, които доставят достатъчно кислород за нискотемпературното окисление на въглищата. Дългите траектории на фигурите, илюстрирани с непроменящата се посока на скоростните вектори, са по-малко опасни, поради значимото намаляване на транспортирания в дълбочина на матрицата кислород, концент-

рацията на който определя скоростта на окисление на въглищата.

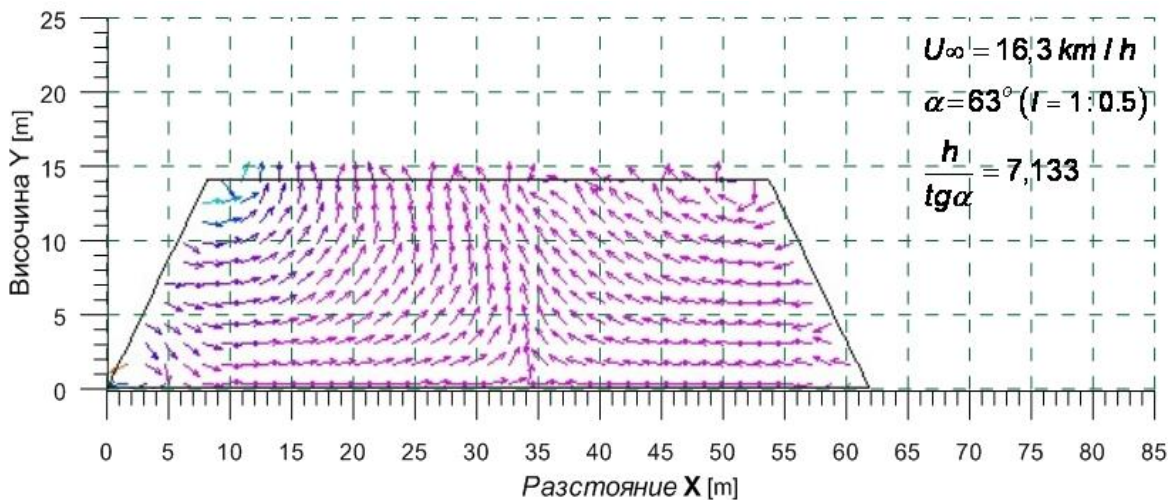
Резултатите от численото моделиране на течението във вътрешността на склада за въглища, заедно с полето на налягането, дават възможност да се оцени ефективната област на превантивна обработки с различни състави в стадия на нискотемпературно окисление, когато температурата на нагетите петна по повърхността на купа е достигнала 55-65°C. Този извод се отнася както за обемно въздействащи превантивни агенти, така и за различни изолиращи покрития.



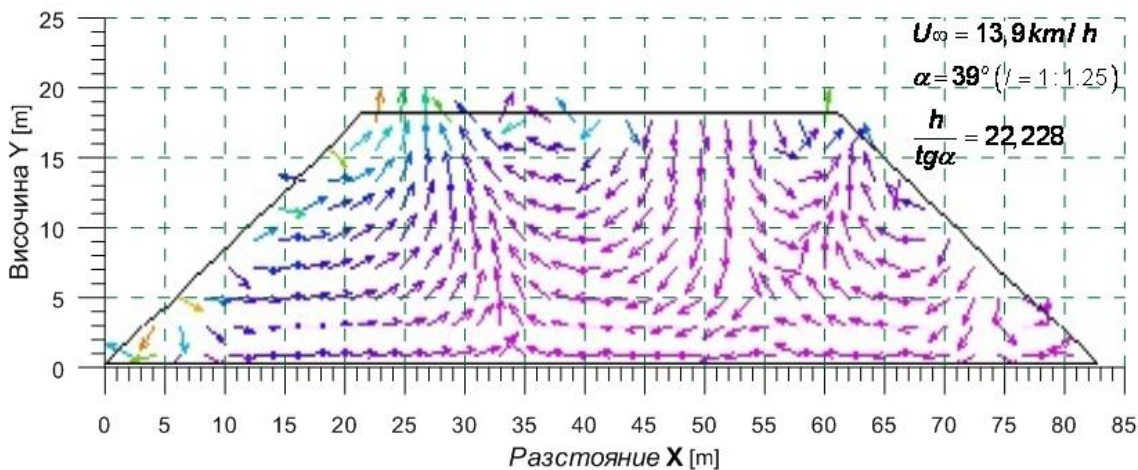
Фиг. 3а



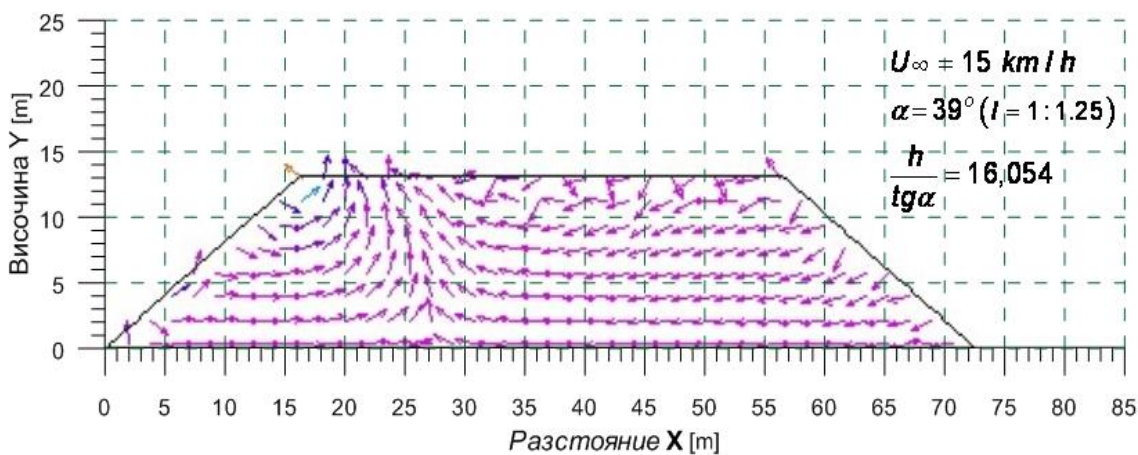
Фиг. 3б



Фиг. 3в



Фиг. 4а



Фиг. 4б

Влияние на инжектиране и покриване с хидрогел

Обработката на нагreti зони от склада с хидрогел, във всички стадии на развитие на самозапалването на въглищата, може да става чрез инжектиране в дълбочина нагretата зона или чрез покриване на нагretите зони и други участъци – за промяна на пътя на утечките на въздух.

Смесването на въглища с два размера хидрогел дадоха неочаквани резултати за промяната на филтрационните характеристики на порестата среда. При опитите е използван полимер - натриев полиакрилат (CAS№9003-04-7) с два размера (фиг.) и означения:

SZ – под $1000 \mu m$,

с преобладаваща фракция $+800...-1000 \mu m$;

MZ – от $850 \mu m$ до $2000 \mu m$,

с преобладаваща фракция $+1-2 mm$.

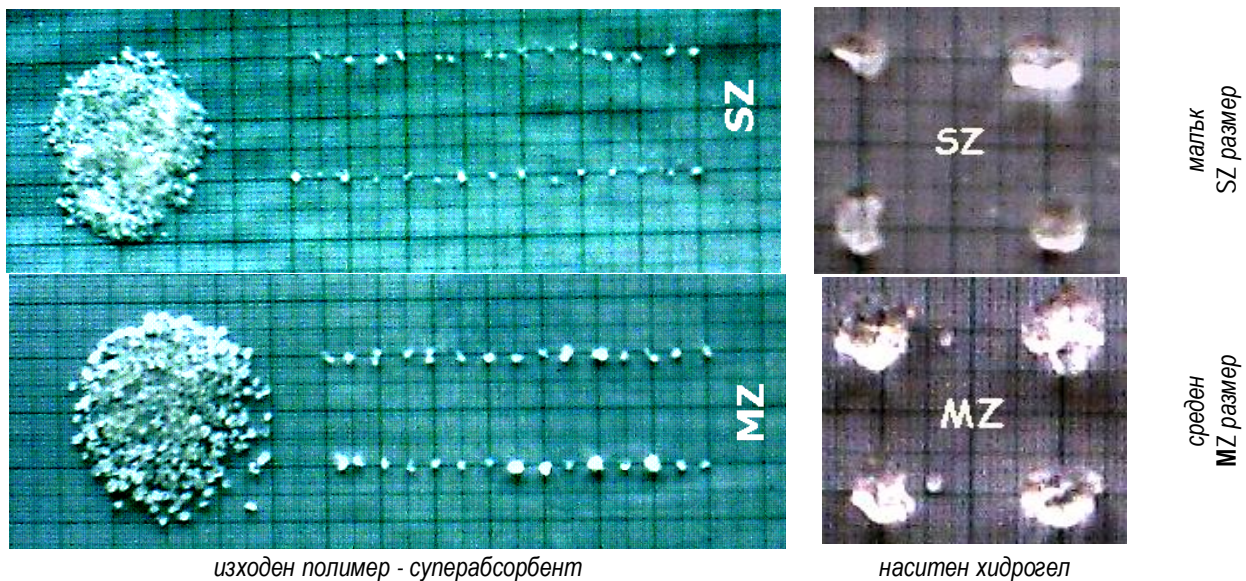
На фигурата са показани размерите на частиците на полимера и на хидрогела - след пълно насищане с вода. Сравнението на градиента на налягането на фиг. 6 показва намаляване на градиента на налягането с размесване на въглищата с хидрогел. С увеличаване на размера на частиците на хидрогела намалява загубата на налягане за преминаване през матрицата. В табл.3 е показано

изменението на характеристиките на порестата матрица след размесване на въглища с $d_e=1,444 mm$, с двата размера (*SZ* и *MZ*) хидрогел. С индекс "прим" са означени стойностите на величините след обработка с хидрогел. Коефициентът на инерционно съпротивление намалява с $2/3$ до $1/2$, докато коефициента на вискозно съпротивление – от 40 до 77% при смесване на въглищата с гел с едрина *MZ* и финия *SZ* гел, съответно. Финият гел намалява проникваемостта *K* на матрицата по-малко отколкото размесването на въглищата с по-големия размер *MZ* (фиг.6 и табл.3). За тази промяна съществуват различни обективни и хипотетични причини:

- увеличаването на влажността на въглищата винаги води до нарастване на тяхната проникваемост и намаляване на загубата на налягане;
- средите с такава голяма анизотропност (табл.1) имат непрогнозируемо поведение при смесване с гел, поради неясното преразпределение на най-фините фракции след инжектиране на гела и размесването му с въглищата;
- хидрогелът е съставен от частици с изключителна еластичност, някои от които се деформират под действие на налягането на въздуха, наблюдавано от нас като трептене на гела в зоните в които се реализира течението. Така се променя сечението на филтрационните канали в съответствие с пулсациите на налягането на протичащия въздух;

- частиците на гела имат несравнимо по-малко съпротивление от триене в сравнения с ръбестата повърхност на въглищните късове. Това се доказва и от по-голямото относително

намаляване на коефициента на вискозно съпротивление α'/α , в сравнение с β'/β .



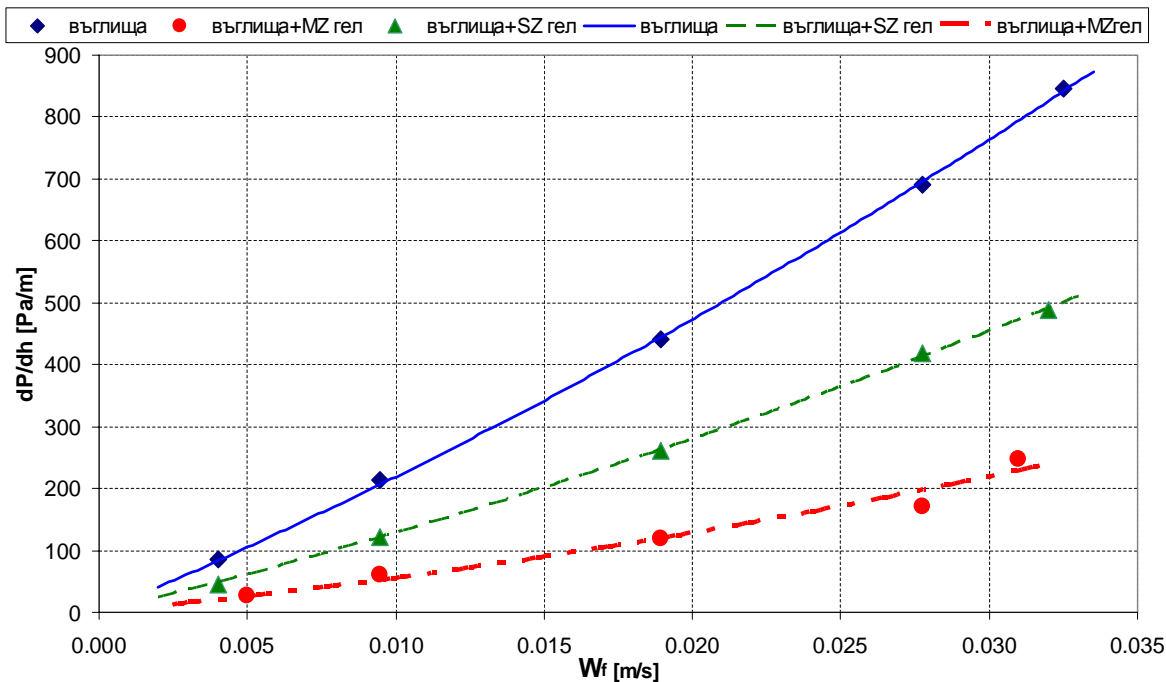
изходен полимер - суперабсорбент

наситен хидрогел

Фиг. 5.

Таблица 3

	a.m [kg/m ³ .s]	b.r [kg/m ⁴]	a [m ⁻²]	b [m ⁻¹]	K [m ²]	$\frac{\alpha'}{\alpha}$	$\frac{\beta'}{\beta}$	$\frac{K'}{K}$
въглища (B)	20130	177181	1.290E+09	1.489E+05	7.750E-10	1	1	1
B + MZ	11804	111451	7.567E+08	9.366E+04	1.322E-09	0.586	0.629	1.705
B + SZ	4574.4	90116	2.932E+08	7.573E+04	3.410E-09	0.227	0.509	4.401



Фиг. 6

На този етап на познание липсва достатъчно информация за количественото характеризане на всеки от тези фактори и особено на тяхното взаимно влияние върху промяната на структурата и аеродинамичните

характеристики на порестата матрица. Поради това в аналитични пресмятания може да се приеме, че размесването на анизотропни среди с хидрогел променя пористостта на матрицата. При тази хипотеза, колкото по-

големи са частиците на наситения с вода суперабсорбент, толкова по-голяма става пористостта на матрицата, което е в съответствие с опитните резултати представени в табл.1 и на фиг.6..

Опитите за покриване на порестата матрица с хидрогел се отнасят до получаване на реална представа за поведението на гела при създадено от вятъра или естествената (топлинна) конвекция депресия. Теоретично, налягането на газовия поток трябва да преодолее и хидростатичния напор, който слоя гел върху порестата матрица създава, което за малки скорости на Дарси може да бъде описано с известната зависимост:

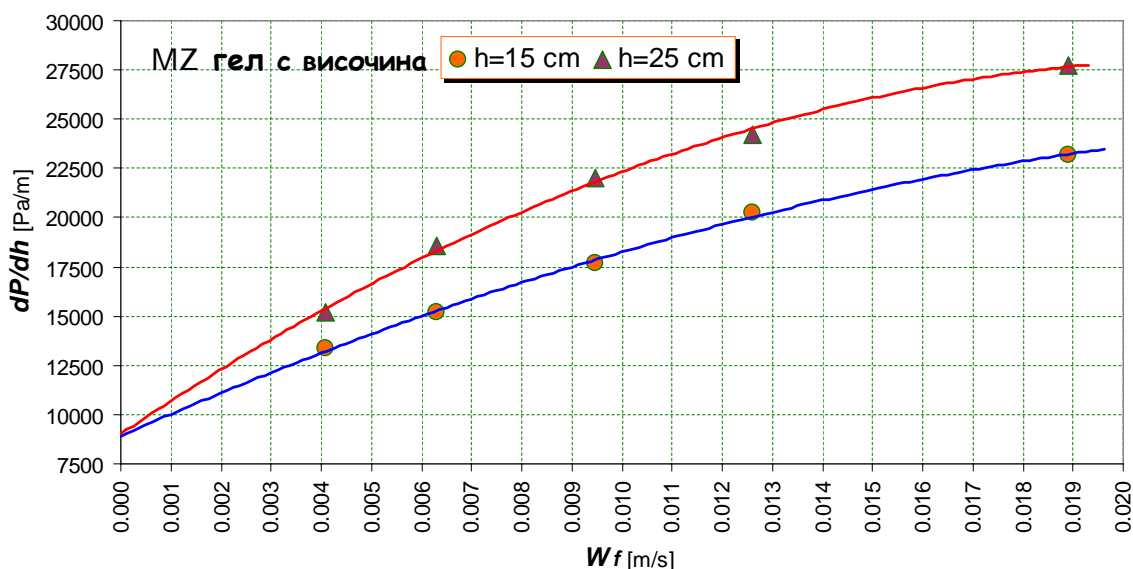
$$\frac{dP}{dh_{gel}} = -\frac{\mu}{K} u + \rho_{gel} \cdot g \quad (14)$$

от която след интегриране за надналягането преди пробив на въздуха ($u=0$) през слой гел с височина h_{gel} и плътност ρ_{gel} се получава:

$$\Delta P = P_0 - P_{\infty} = \rho_{gel} g h_{gel} \quad (14a)$$

Данните от опита, на фиг.7 показват по-малко налягане на пробива ($скорост=0$) на фигурата, от теоретично изчисленото по (14). При опитите беше наблюдавано изтичане на въздух от горната повърхност на колоната с гел в 2 до три точки. Това очевидно е пътя с най-малко съпротивление. Ефекта беше визуализиран и чрез нанасяне тънък слой воден разтвор на пенообразувател върху откритата повърхност на хидрогела. Пенните мехурчета потвърдиха нашите наблюдения, че течението в гела се осъществява през "избрани" канали с минимално съпротивление, получено от подреждането на частиците на гела и еластичната им деформация и разместване под действие на налягането на въздуха.

Вторият съществен извод от показаните на фиг.7 опитни резултати е, че загубата на налягане от протичането на въздушен поток в хидрогела е нелинейна функция не само на скоростта на Дарси (Wf), но и на височината (h) на слоя гел. Това изисква експериментално изследване на всеки хидрогел, за установяване на неговите изолиращи характеристики и проницаемост. Графиките на фиг.7 могат да се ползват и за решаване на обратна задача – да се определи преминаването на въздух през гелна покривка, при известно налягане, създадено от ветрови или топлинен източник в покриваната с гел пореста среда.



Фиг. 7.

Изводи

Математическото моделиране на течението на газ в пореста среда с голяма степен на анизотропност изисква експериментално задаване на основните характеристики на средата, поради непредвидимо "разтваряне" и концентриране на фините фракции в макропорите, които по-едри фракции създават.

Двудимензионното моделиране на течението на въздух в пореста среда, при коректно зададени характеристики на средата и на налягането по границите ѝ, дава достатъчно ясни резултати за разпределението на налягането и векторното поле в изследваната област, за проследяване на влиянието на формата на склада и ветровото

натоварване върху опасността от самозапалване на възлицата.

Инжектирането на хидрогел в пореста среда увеличава проницаемостта и намалява коефициентите на вискозно и инерционно съпротивление, което на този етап на познание може да бъде отразено с увеличаване на пористостта на средата в обичайните зависимости.

Началното налягане на пробив на въздуха през слой от хидрогел е по-ниско от хидростатичното налягане. Загубата на налягане при течение на въздух през хидрогелен слой е нелинейна функция на скоростта на Дарси и дебелината на слоя.

Литература

- [1] М.Михайлов, Ал.Крилчев, Е.Власева. Експериментално и числено изследване на обтичането на складове за въглища от вятъра.
- [2] P. Forchheimer. Wasserbewegung durch Boden Zeitschrift des Vereines Deuts Ingenieure, 45 1901, pp. 1736–1741 & 1781–1788
- [3] Michaylov M.A., E.D.Vlasseva, On Void Airdynamics in a Porous Media of a Gob Area, 7-Th. US Mine Ventilation Symposium, Lexington, Kentucky, 3-7 June 1995, pp. 275-280.
- [4] S. Ergun. "Fluid flow through packed column." Chem. Eng. Prog 48/1952, pp 89-94.
- [5] Dvorkin. KOZENY-CARMAN EQUATION REVISITED, 2009, http://pangea.stanford.edu/~jack/KC_2009_JD.pdf
- [6] Kunii, D. and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, Krieger, New York, 1991
- [7] Puchkov L., S. Alexchiev, On Resistance Law Formulation and Methodology for Evaluation of Aerodynamical Properties of Gob Zones using In-situ Eksperiments, Moskow, Nauka, 1965.
- [8] <http://www.pdesolution.com>