

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО И ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОБТИЧАНЕТО НА СКЛАДОВЕ ЗА ВЪГЛИЩА ОТ ВЯТЪРА

Михаил Михайлов, Александър Крилчев, Елена Власева

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

РЕЗЮМЕ. Статията представя избрани резултати от изследване на обтичането на складове за въглища с пирамидална форма. Изследването е двумерно и дава нови данни за аеромеханиката на обтичане на пресечена пирамида, включително разпределението на налягането по стените на склада, характеризирани чрез безразмерния коефициент на налягането. Установено е ново положение на неутралната равнина от наветрената стена на склада, разделяща зоните на компресия и депресия, и влиянието на формата на склада върху положението на тази равнина. Направени са изводи за проектирането и численото моделиране на обтичането на складове с препоръки за оптимизиране на формата на складовете.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF WIND FLOW OVER STOCKPILES

Michael Michaylov, Alexander Krilchev, Elena Vlasseva

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; michaylov@mgu.bg, krilchev@mgu.bg, elena@mgu.bg

ABSTRACT. Paper presents results from laboratory tests of flow over stockpiles with pyramided shape. Research is performed two-dimensionally and gives new information about flow aeromechanics over truncated pyramid. This includes pressure distribution over stockpile walls via dimensionless pressure coefficient. New location of neutral plane over windward wall which divides overpressure and depression zones is cleared up as well stockpile shape on this location. Results of physical modeling are compared and enriched with numerical modeling. Conclusions are made for stockpiles design parameters in order to optimize stockpile shape.

Въведение

Самозагриването на въглищата е основен проблем на тяхното складиране и продължително транспортиране. Складирането на големи обеми въглища за продължителен период винаги е важно условие за ритмичната и надеждна работа на топлоелектрическите централи. Разделянето на въглищните мини от технологично свързани с тях топлоелектрически централи при разпадането на минно-енергийните комбинати също допринесе за необходимостта от увеличаване на обема и периода на пребиваване на въглищата в складовете. Вносът на въглища за населението показва същата тенденция, която дори се утежнява от по-ниската им цена през летните месеци, когато се извършват доставките.

Капацитетът на складовете за въглища обикновено е от 100000 до 130000 t. В складовете на мините въглищата са с едрина - 200 mm, а в складовете на топлоелектрическите централи – 80-50 mm.

Опасността от самозапалване на въглищата при обтичане от вятъра определи и утвърди в практиката като относително пожаробезопасна, формата на склада за въглища – пресечена пирамида, с дължина многократно по-голяма от широчината при основата. В страната липсват нормативи за основните параметри на складовете. Повечето нормативи в други страни се въвеждат на основата на моделиране на процесите на самоагриване, като в моделите се залагат конкретни характеристики на въглищата от находището, което ограничава областта на приложение до находището, за което се извършва изследването.

Два главни природни фактора определят риска от самозапалване на въглищата в складовете:

- ⇒ тяхната природна предразположеност към окисление при нормални температури, която се обобщава като „склонност към самозапалване“, и
- ⇒ ветровото натоварване на склада, което определя доставката на кислород във въглищната матрица и филтрационното течение нея през ранния стадий на развитие на самозапалването.

При численото моделиране на процесите на самозапалване в складовете, поради липса на опитни зависимости за обтичане на фигури с форма на пресечена пирамида, се използват теоретични и експериментални модели за обтичане на ниски полегати хълмове. По наше виждане тези модели, са твърде отдалечени от формата на складовете и въпреки това са най-близката теоретична и експериментална основа за моделиране.

Изследванията в областта на обтичането на хълмове с различна геометрия започват в средата на миналия век, като в последните десетилетия се развиват във връзка с моделиране на разпространението на замърсявания в атмосферата при оценка на въздействието върху околната среда. Други актуални цели на изследванията на влиянието на терена върху течението на вятъра над хълмист терен са свързани с избора на места за ветрогенератори. Примери за модели, които се ограничават до влиянието на топографията и то на ниски полегати хълмове с малък наклон са: теоретичните модели на Jackson и Hunt [1], Mason и. King [2], на изследванията в

аеродинамични тунели [3-6] и експерименталното и численото изследване в [7]. Едно изследване на пирамидални строителни конструкции [8] анализира течението около островърхи пирамидални строителни конструкции с квадратна и триъгълна основа, и много голям ъгъл на наклона на стените на пирамидите. Въпреки отдалечеността на тези конструкции от формата на складовете за въглища много прецизно са изследвани в [8] рециркуляционните зони около пирамидите.

В строителните кодове [9-11] се дават някои таблични зависимости за коефициента на налягане C_p при ветрово обтичане на наклонените повърхнини на покривите на сградите, които са неприложими към складовете за въглища поради много малкия наклон (11-14°) на едноскатните и двускатните покриви.

За моделиране на samozапалване на въглища в плоски насипища, в [12] се търси зависимост за разпределение на налягането по повърхността на едноскатен хълм. След сравняване на стендови и натурни измервания на три насипища с височина от 11 до 35m .В.И.Саранчук, определя стойности на безразмерното налягане $\Delta P \equiv C_p$ (коефициента на налягане) в границите от -0.2 до +1 за повърхността на наветрената страна и горната хоризонтална повърхност на насипищата.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Целта на изследването е да се определят:

- ⇒ разпределението на налягането по повърхността на модела на склада за въглища;
- ⇒ влиянието на ъгъла на наклона на склада върху обтичането на фигурата му;
- ⇒ влиянието на скоростта на вятъра върху полето на налягането около и по повърхността на склада.

При обтичане на тела с различна конфигурация, в експерименталната аеродинамика е прието, действието на потока върху тялото да се характеризира с безразмерния коефициент на налягането C_p . Той се дефинира от уравнението на Бернули за несмутено течение пред модела на склада, по посока на течението и за всяка точка "i" по повърхността на модела на склада, както следва:

$$P_\infty + \frac{\rho U_\infty^2}{2} = P_i + \frac{\rho U_i^2}{2} = const, \quad (1a)$$

от което за разликата в статичните налягания може да бъде записано:

$$P_i - P_\infty = \frac{\rho U_\infty^2}{2} - \frac{\rho U_i^2}{2} = \frac{\rho U_\infty^2}{2} \left[1 - \left(\frac{U_i}{U_\infty} \right)^2 \right] \quad (1)$$

където: P_∞ е статичното налягане в несмутеното течение пред склада, Pa;

U_∞ - скоростта на потока в несмутеното течение пред склада, m/s;

ρ - плътността на въздуха, kg/m³;

U_i - статичното налягане в i-тата точка на повърхността на модела, Pa;

P_i - скоростта на потока в i-тата точка на повърхността на модела, m/s.

Коефициентът на налягане C_p се дефинира като безразмерното отношение на разликата в статичните налягания на точката i на повърхността на обтичания модел и на несмутеното течение, отнесена към скоростния напор на несмутеното течение:

$$C_p = \frac{P_i - P_\infty}{\rho U_\infty^2 / 2} = 1 - (U_i / U_\infty)^2 \quad (2)$$

В това изследване C_p се изчислява по измерванията на P_i, P_∞, U_∞ и ρ . Второто равенство в (2) позволява да се определи скоростта на потока в мястото на измерването на налягането на повърхността на модела по зависимостта:

$$U_i = U_\infty \sqrt{1 - C_p} \quad (2a)$$

Стойностите на C_p за изследваното течение и модел на склада се тълкуват в съответствие с дефиницията (2), както следва:

$C_p = +1$ при $U_i = 0$ - когато течението среща ръб, който променя посоката на движение на потока или разделя течението;

$+1 > C_p > 0$ при $U_i < U_\infty$ - в тези зони течението се свива и статичното налягане се повишава над това в несмутеното течение, т.е. $P_i > P_\infty$;

$C_p = 0$ при $U_i = U_\infty$ - скоростта на обтичане се изравнява с тази на несмутеното течение;

$C_p < 0$ при $U_i > U_\infty$ - налягането на повърхността на модела на склада става по-малко от налягането на несмутеното течение, т.е. $P_i < P_\infty$.

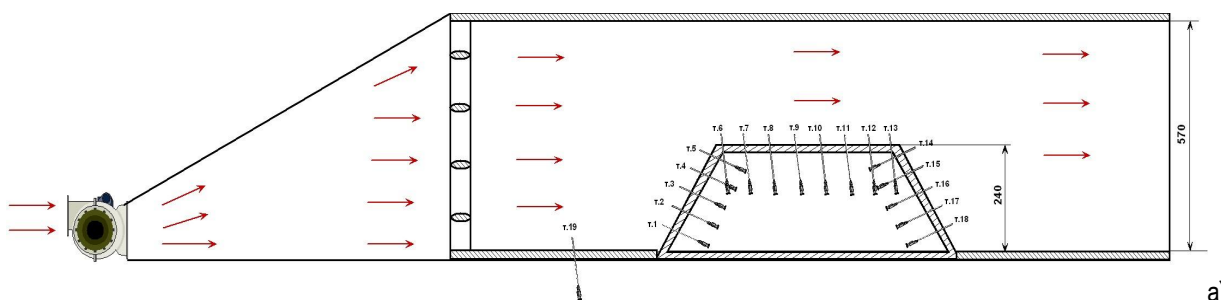
1.1. Опитна постановка

Надлъжните и напречните сечения на пресечена пирамида представляват равнобедрен трапец с височина h и ъгъл на наклона на откосите α спрямо основата. Отчитайки обстоятелството, че процесът на samozапалване се развива по нормала към откоса на склада задачата за неговото обтичане може да се разгледа във вертикално сечение.

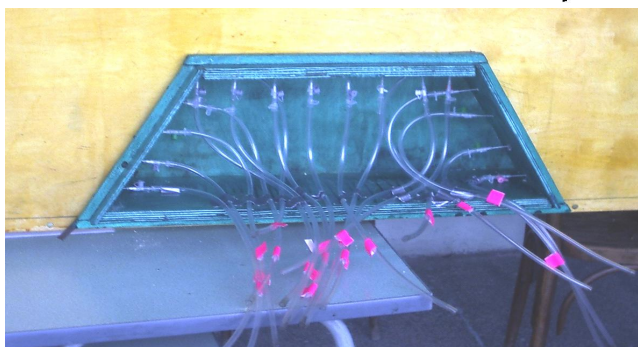
За моделиране на течението около пирамидален склад на въглища и изследване на полето на скоростта и на налягането са разработени два стенда (фиг.1) с различни геометрични размери и ъгли на наклона на склада, дадени в табл.1. Това е двумерен модел на склад за въглища с напречна ширина на модела $W=0,118$ m. Височината на модела се намалява с фасонни дървени трупчета, които прилягат плътно към пода на стенда и наклонените стени на модела (фиг.2) от наветрената и подветрената му страна.

Таблица 1

Стенд-№	Размери на стенда						Размери на модела на склада						
	H [m]	X [m]	x ₀ [m]	H/h	X/h	W/h	L [m]	α°	l [m]	h [m]	L/h	l/h	x/h
I - 1	0.572	1.80	0.54	2.38	7.50	0.49	0.678	59°45'	0.398	0.24	2.825	1.658	0.583
I - 2	0.522	1.80	0.564	2.75	9.47	0.62	0.620	59°45'	0.398	0.19	3.262	2.095	0.583
I - 3	0.472	1.80	0.59	3.37	12.86	0.84	0.561	59°45'	0.398	0.14	4.009	2.843	0.583
II - 1	0.572	2.41	0.73	3.18	13.39	0.66	0.838	39°17'	0.398	0.18	4.656	2.211	1.222
II - 2	0.522	2.41	0.79	4.02	18.54	0.91	0.716	39°17'	0.398	0.13	5.508	3.062	1.222
II - 3	0.472	2.41	0.84	5.90	30.13	1.48	0.549	39°17'	0.398	0.08	6.838	4.394	1.222



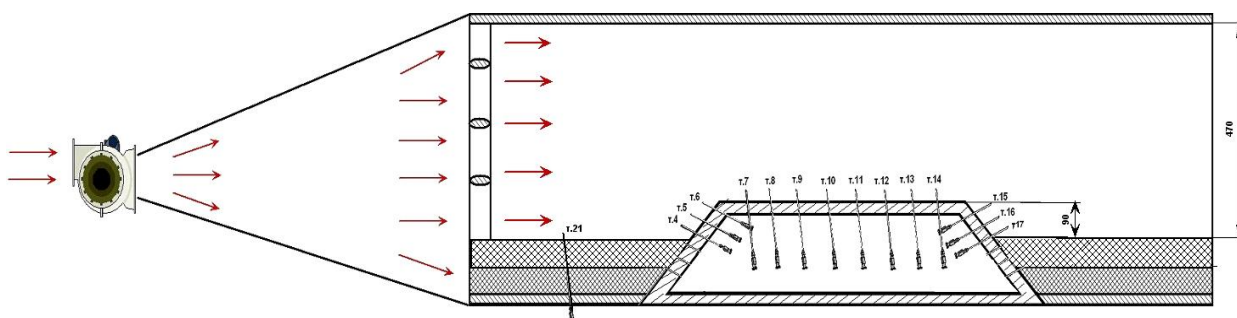
а)



б)

Фиг. 1. Схема на стенда – а и на модела на склада - б

Изравняването на скоростния профил на течението пред модела на склада се извършва с направляващ апарат от крила, а налягането на повърхността на склада се измерва в точките, показани на фиг.1 и фиг.2.

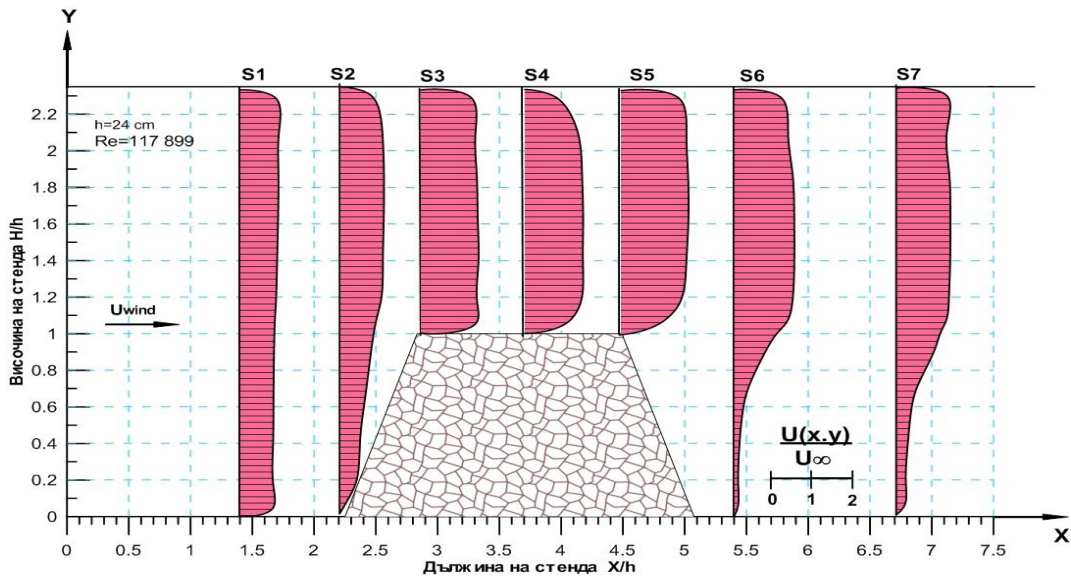


Фиг. 2. Редуциране на височината на склада и стенда – I-2, I-3 и II-2, II-3 в табл. 1

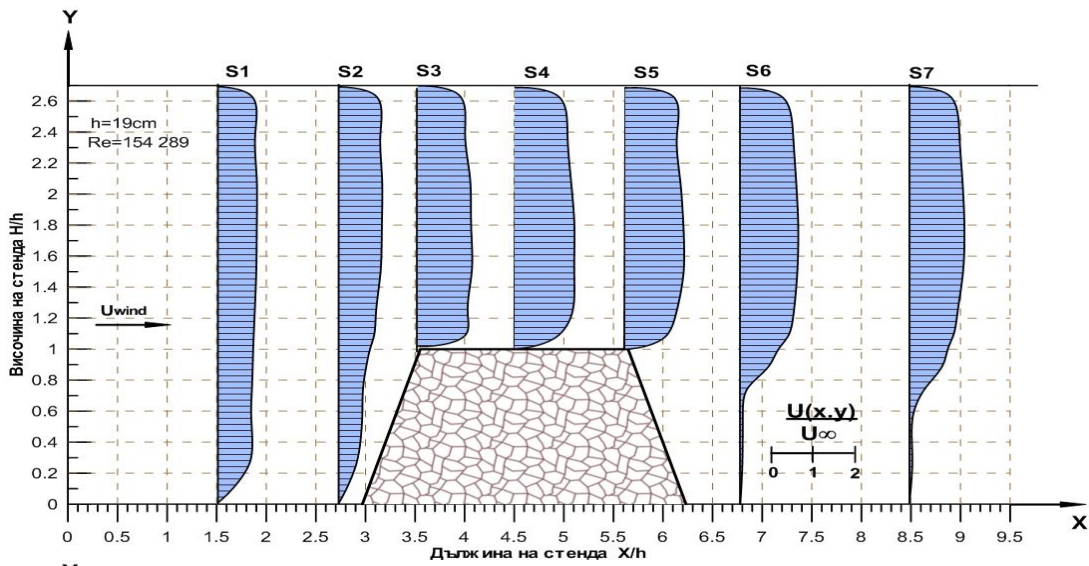
Скоростта на несмутеното течение U_{∞} се променя чрез безстепенно изменение на скоростта на въртене на работното колело на вентилатора. Скоростният профил се снима в седем (стенд I) и осем (стенд II) сечения по дължината на течението с измерване на скоростта в единадесет точки по височината на всяко сечение.

1.2. Експериментални резултати

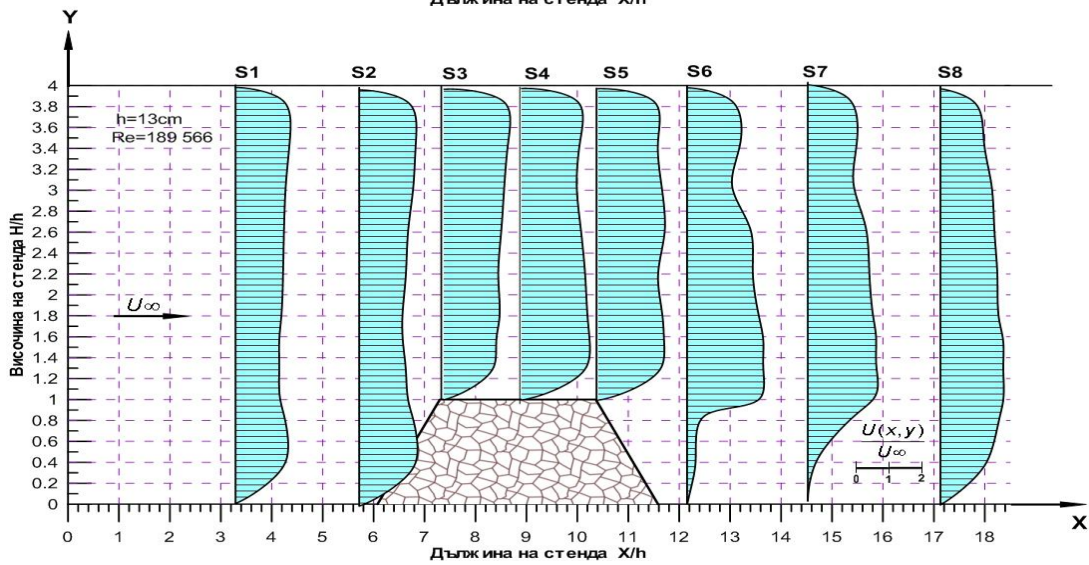
Скоростно поле. Вертикалните профили на скоростта на надлъжното течение се снимат в централната равнина ($W/2$), равноотдалечена от страничните стени на стенда. Скоростта се снима в седем сечения (S1-S7) с 11 измервания с термоанемометър тип TESTO 435 във всяко от тях. Част от резултатите от опита са показани на фиг.3, където скоростта U във всяка точка на профилите е обезразмерена спрямо скоростта на несмутеното течение U_{∞} .



$\alpha=59^{\circ}45'$



$\alpha=59^{\circ}45'$



$\alpha=39^{\circ}17'$

Фиг. 3

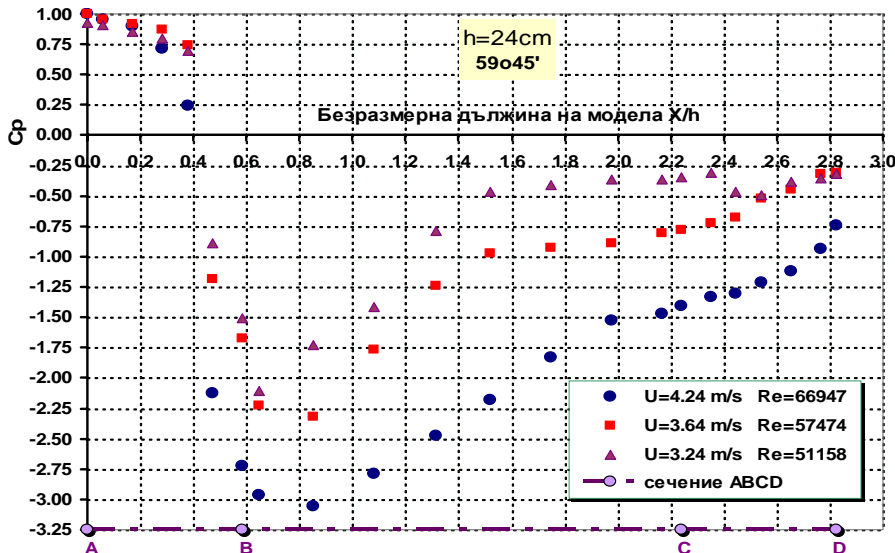
Подобието на скоростните профили от опита при промяна на критерия на Рейнолдс от 107634 до 349113 , дава основание обтичането на склада да се разглежда като аеромеханична задача, въпреки че той не е изцяло

потопен в движещия се флуиден поток. От тази позиция полето на налягането по повърхността на склада се анализира чрез безразмерното налягане, съответстващо на статичния коефициент на налягане C_p в аеромеханиката.

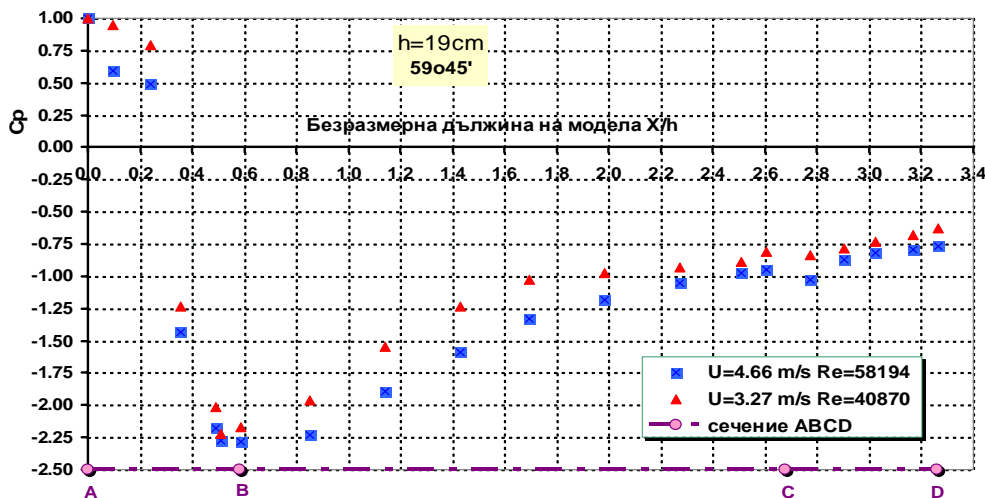
Наблюдаваното подобие е и причина за търсене на приложимост на численото моделиране на течението и верификация на резултатите от него с опита.

Поле на налягането. На наветрената страна АВ на склада при всички опити (фиг.4 и фиг.5) коефициентът на налягането променя знака си и при преминаване през неутралната хоризонтална равнина приема нулева стой-

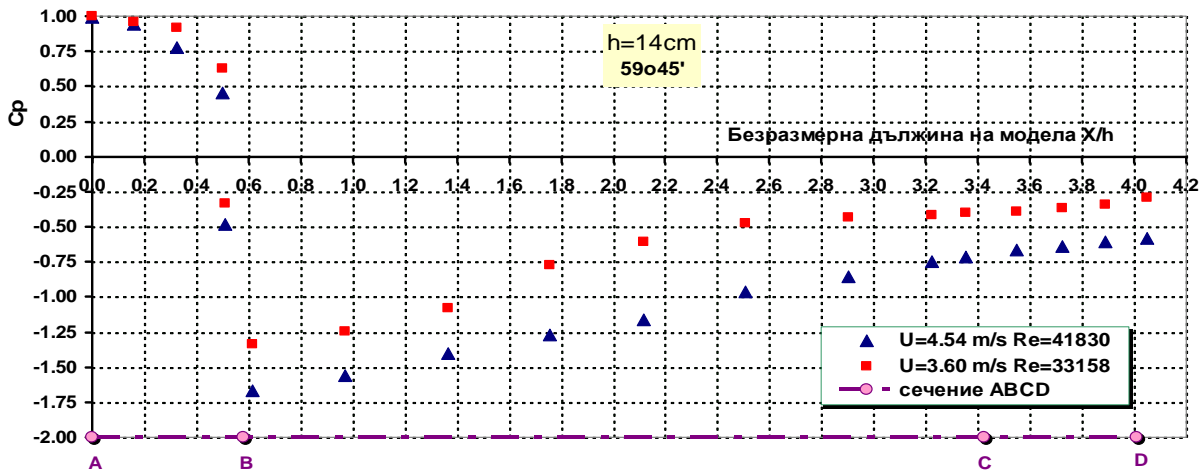
ност. На фиг.6 е показано изменението на безразмерната височина $\left[(y/h)_{Cp=0} \right]$ на неутралната равнина в зависимост от формата на склада. Тя е характеризирана чрез отношението $(h/tg\alpha)$ на височината на склада в m и ъгъла α на наклона на стената АВ спрямо хоризонталната равнина.



a)

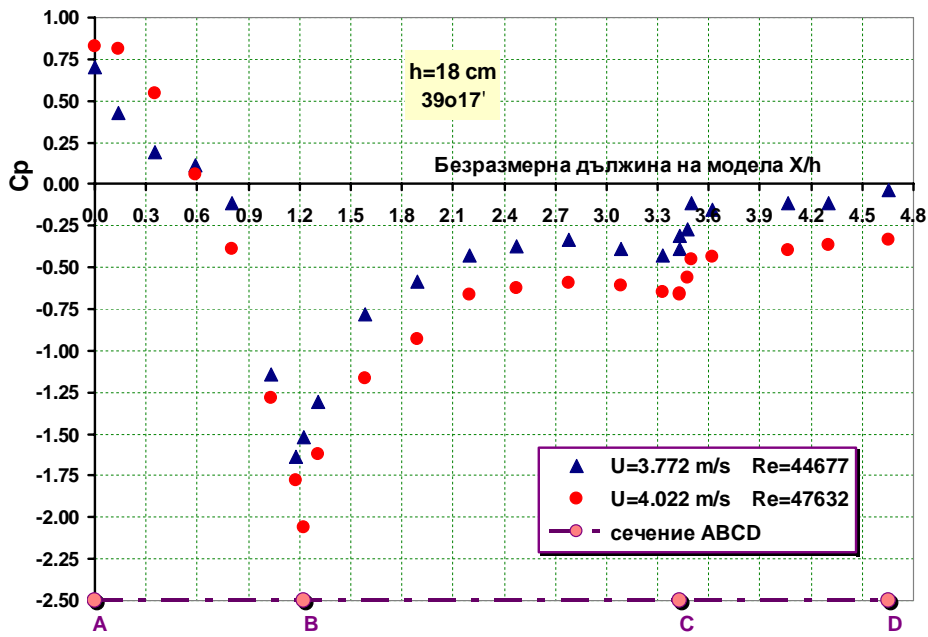


б)

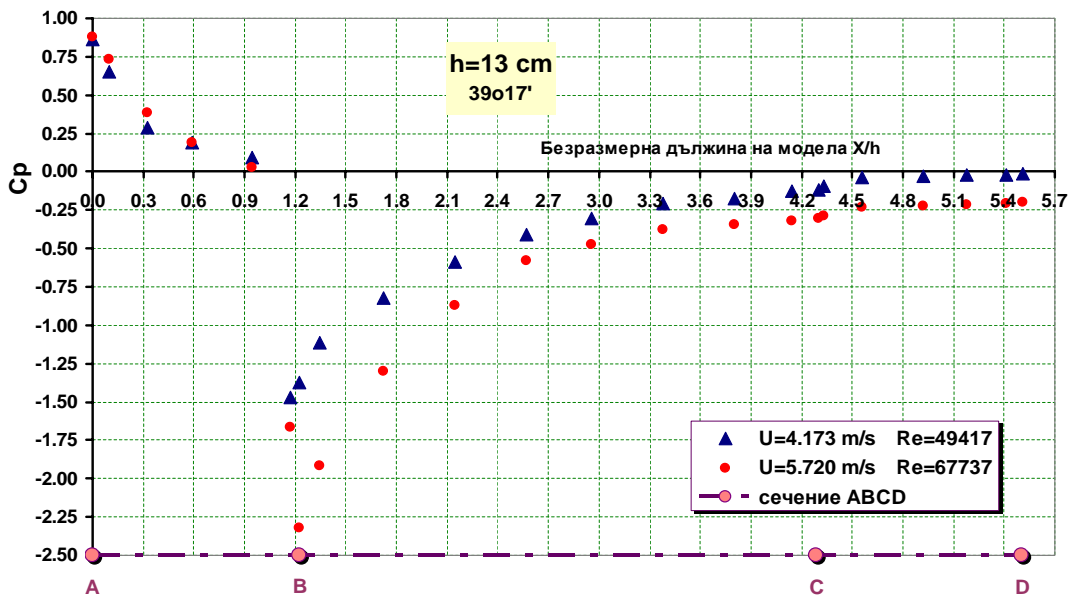


в)

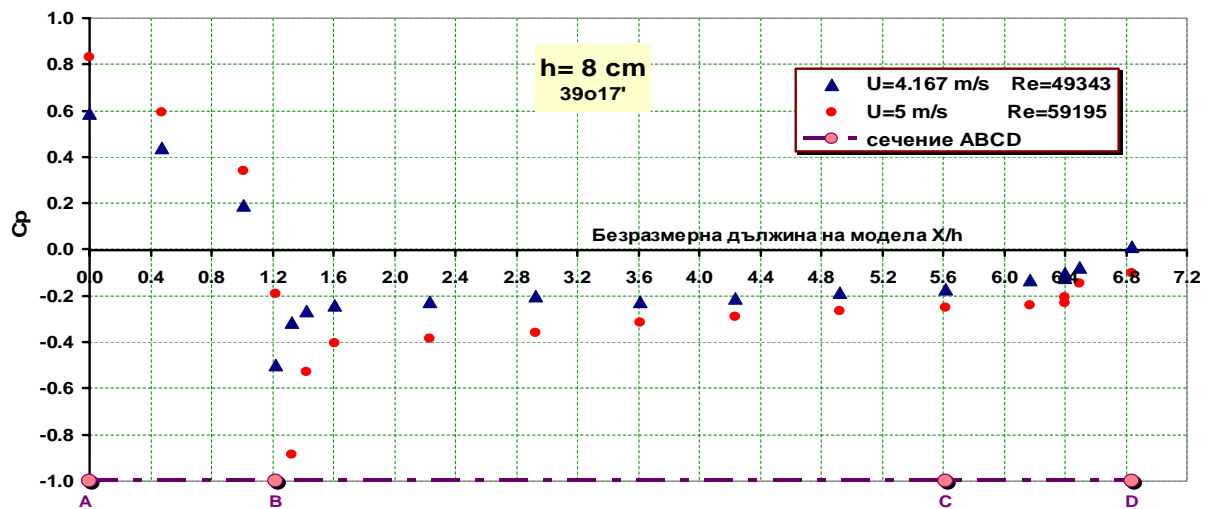
Фиг. 4



a)



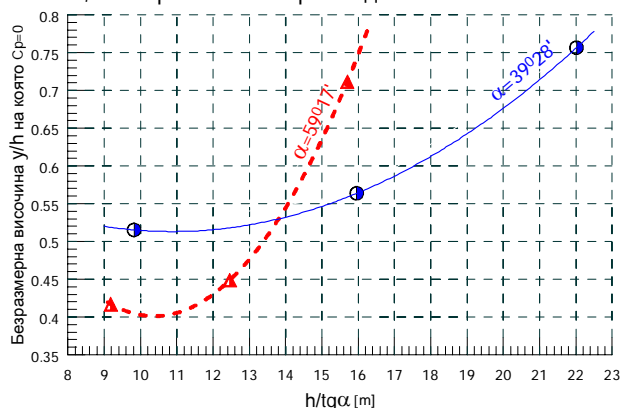
б)



в)

Фиг. 5

Според резултатите от опита промяната на безразмерната височина $\left[(y/h)_{Cp=0} \right]$ на неутралната равнина се изменя незначително от скоростта U_∞ на несмутеното течение, за скорости на вятъра 9.5 до 20.5 km/h.



Фиг. 6.

Точките на фиг.6 представят средното положение на неутралната равнина при три скорости U_∞ на вятъра за всяка форма $(h/tg\alpha)$. Кривите на фигурата се описват със зависимости от втора степен. Под неутралната равнина се намира зоната на сгъстяване (компресия), в която $+1 \geq C_p > 0$, където налягането е по-голямо от това на несмутеното течение ($P_i > P_\infty$). В тази зона $0 \leq (y/h) \leq (y/h)_{Cp=0}$ в склада постъпва основния въздушен дебит от ветровия поток.

Над линията на неутралната равнина $(y/h)_{Cp=0} \leq (y/h) \leq 1$ налягането става по-малко от това на несмутения поток на вятъра $P_i < P_\infty$ и се получава разреждане (депресия) на въздуха.

Повдигането на неутралната равнина (фиг.6) с увеличаване на височината на склада показва нарастването на частта от наветрената страна, през която в склада постъпва основния въздушен дебит. Това нарастване е по-бързо при по-стръмния наклон ($\alpha = 59^\circ 45'$), отколкото при по-полегатия ($\alpha = 39^\circ 28'$). Така с увеличаване на реалната височина на склада h площта, през която въздухът ще постъпва в склада, ще нараства повече и по-бързо при стръмния наклон на наветрената страна AB.

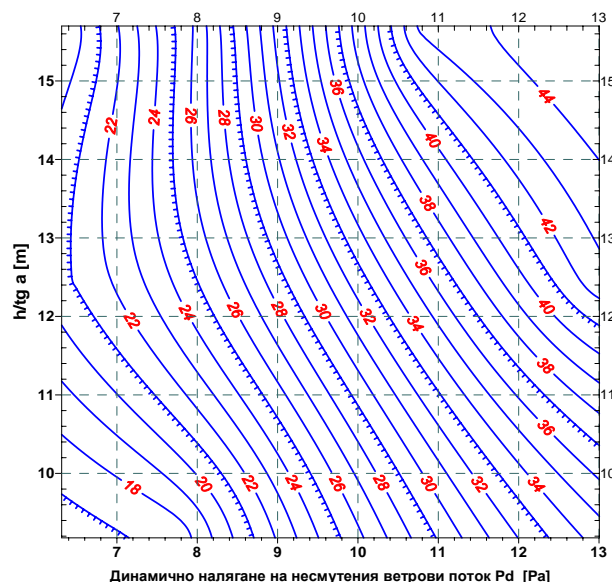
Тези резултати (фиг.6) са значимо различни от данните за положението на неутралната равнина, която за сгради с правоъгълно сечение и за покриви се приема, че съвпада с най-високата точка на наветрената страна [9,10]. Подобен резултат е получен и в [8] за островърха пирамида с триъгълно и квадратно сечение на основата.

По горната основа BC на склада коефициентът на налягане остава отрицателен, като расте от наветрената към подветрената страна. В тази зона се достига и минималното налягане по стените на трапецовидното сечение.

Графичната зависимост на разликата между максималното налягане в т.А – за всички опити, и минималното – което се наблюдава по горната повърхност BC на модела в зависимост от формата на склада $(h/tg\alpha)$ и динамичното налягане P_d^∞ на несмутения поток на вятъра, е показана на фиг.7, на която:

$(dP_i)_{\max} = P_i^{\max} - P_i^{\min} \equiv P_A - P_i^{\min}$ е нанесено на изолините в Pa, а

$(h/tg\alpha)$ е в m при мащаб на моделирането 1:100.



Фиг. 7.

Ясно се вижда как с увеличаване на височината h и наклона α на околните стени на склада, и на скоростта на вятъра нараства и максималната разлика на размаха на налягането по повърхността на фигурата. Тази разлика определя дебита и дълбочината на проникване на въздух в порестата среда на склада.

Най-характерния процес на подветрената страна CD на склада е формирането на рециркуляционна зона с различна дължина при промяна на формата на фигурата (табл.1) и ветровия поток. Размерите на тази зона са анализирани заедно с резултатите от численото моделиране за още един характерен наклон на околните повърхнини на склада.

2. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ

Обтичането на складовете е моделирано със специализиран софтуер Flex PDE @ version 5, разработен от професор Gunnar Baskstrom от университета в Мальмо Швеция [13]. Софтуерния продукт FlexPDE решава линейни и нелинейни диференциални уравнения по метода на крайните елементи. Уравненията, граничните условия и областта на изследване се задават с вграден в системата редактор. Решенията се представят графично и таблично.

Изследва се двумерната област:

$$D = [x \in (0 \div 1.8)m; y \in (0 \div 0.572)m]$$

$$L_x = 1,8m; L_y = 0,572m$$

В тази област е разположен куп с форма на трапец. Размерите му (дължина на основата, височина, ъгъл на наклона на стените и скорост на въздушния поток са показани в табл.2.

Моделирането изследва скоростното поле в околността на трапеца със средни скорости на несмутеното течение, чиито стойности са показани в последната колона на таблицата.

Таблица 2

L [m]	h [m]	α°	U_∞ [m/s]
0.678	0.24	63	3.244
0.594	0.19		3.640
0.543	0.14		4.344
			4.654
0.678	0.10	45	3.25
	0.15		4.656
1.2	0.10	30	3.244
	0.15		4.656
0.859	0.18	39	3.77, 3.85, 9.6
	0.13		4.17, 4.89, 5.72

Скоростното поле се изследва чрез изчисляване на токовите линии на течението в пространството над и около склада. Представя се по следния начин:

Независими променливи в област D - x и y

Зависими променливи:

$U(x; y)$ - вектор на скоростта по координатата x;

$V(x; y)$ - вектор на скоростта по координатата y;

$\psi(x; y)$ - токови линии на течението.

Уравнения на токова линия:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad u = \frac{\partial \psi}{\partial y}; v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Гранични условия:

$x = 0$; $u x = Lx$ за $y \in (0 \div 0.572)$ - проницаема граница. Потокът постъпва през лява граница ($x=0$) и напуска през дясната граница ($x=Lx$).

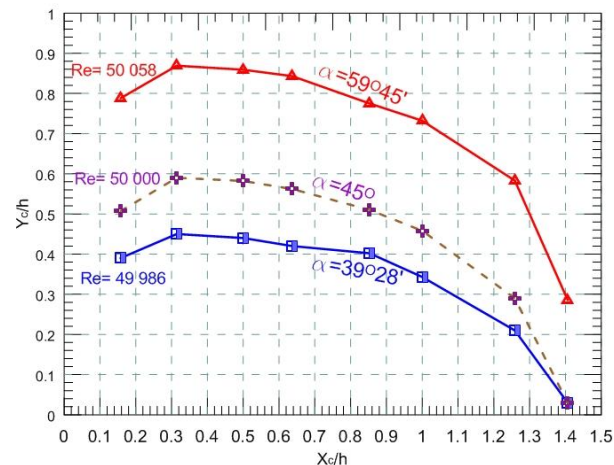
$$\psi(x; y) = u_{cp} \frac{y}{L_y} \text{ - равномерен профил по } y$$

По контура на купта се задава изолирана, непроницаема граница $\psi(x; y) = 0$

Отклонението в средните скорости на профилите от численото моделиране и опитните резултати се различават с 3 до 6%, докато при локалните скорости разликата достига до 11% в отдалечени по Y от горната основа на трапеца точки. На основание тези резултати са моделирани и два допълнителни наклона на стените на склада - $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ (табл.2), сравними резултати от които са показани на фиг.8. Ясно се вижда контрастът на скоростите от промяната на ъгъла на наклона на склада (при равни други условия), който определя и по-големи разлики в наляганията на стените на склада при по-големия ъгъл на наклона $\alpha = 45^\circ$.

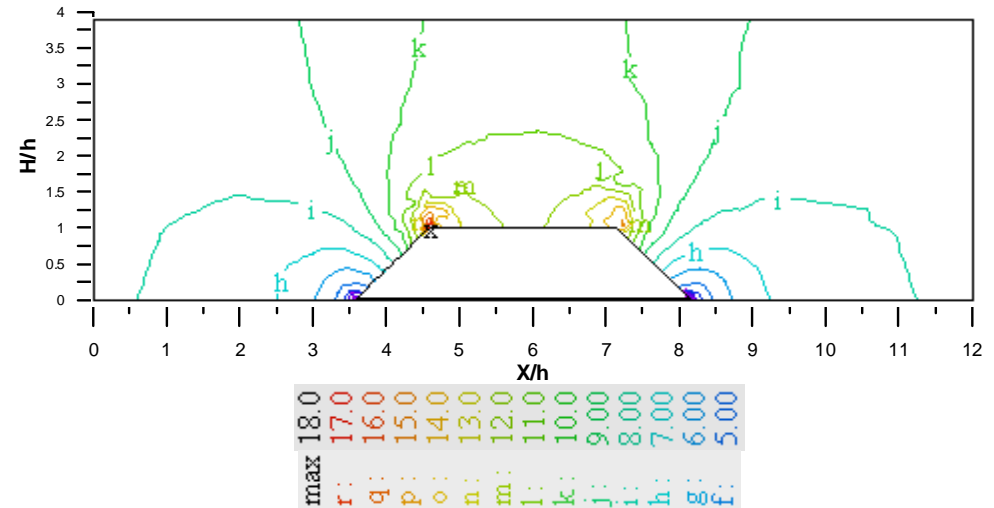
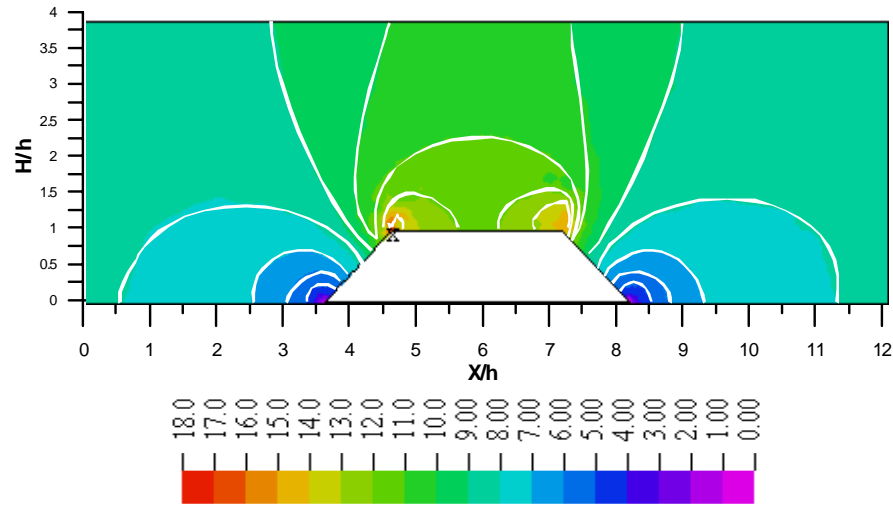
Зона на рециркулация. С увеличаване на височината и наклона на модела нарастват дължината X_c и площта на рециркуляционната зона зад подветрената CD стена на склада. С увеличаване на скоростта на вятъра рециркуляционната зона също нараства. На фиг.9 е показано измерението на дължината X_c и височината Y_c на рециркуляционната зона зад подветрената страна CD, като началото на абсцисата съвпада с точката D. Плътните линии на фигурата са прекарани по данните от опита, а с пунктирната линия са представени резултати от численото моделиране за $\alpha = 45^\circ$ при същата височина на склада и режим на ветровия поток. Границите на зоната се виждат ясно и на фиг.3 и фиг.8.

Намаляването на наклона на стените на склада само с 50mm води до значително намаляване на зоната на рециркулация зад фигурата. Това е от съществено значение за интензивността на течението на въздух в порестата среда на склада в близост до подветрената му стена.

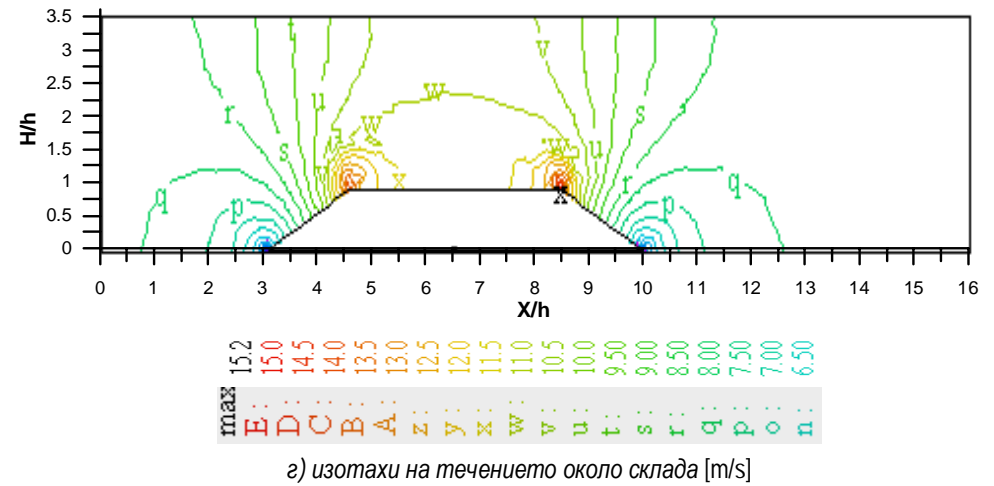
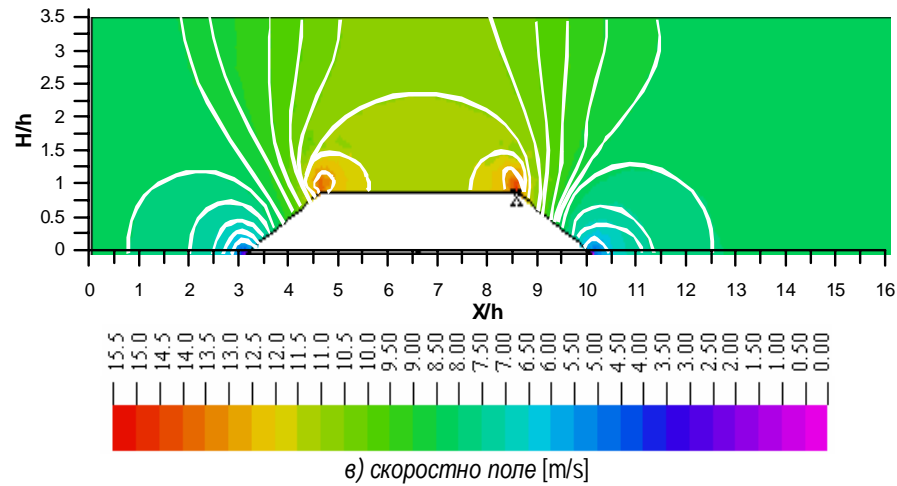


Фиг. 9

$\alpha=45^\circ$; $h=15\text{ cm}$; $h/\text{tg}\alpha=0,15$; $u = 4,656\text{ m/s}$; $\text{Re} = 169\,228$



$\alpha=30^\circ$; $h=15\text{ cm}$; $h/\text{tg}\alpha=0,26$; $u = 4,656\text{ m/s}$; $\text{Re} = \text{Re} = 169\,228$



Фиг. 8. Резултати от численото моделиране за два наклона на стените на склада

3. ИЗВОДИ

Научната теория на аеромеханиката на обтичане на пресечена пирамида не е изяснена в литература до приложими в моделиране на течението на вятъра около складове за възлища зависимости. Възприетите и стандартизирани за строителните обекти и ниски полегати хълмове стойности на коефициента на налягането в моделирането на течението около пресечена пирамида не отразяват реалното разпределение на налягането по повърхността на фигурата.

В тази статия се дава разпределението на налягането чрез статичния коефициент на налягането, по повърхността на пирамидална структура, в зависимост от височината и наклона на стените на обичайната форма на склад за възлища.

В практиката съществува убеждението, че единствения параметър на формата, чрез който може да се управлява риска от самозапалване, е височината на склада. В достатъчно широк диапазон на промяна на формата на склада, показват съществено значение и на ъгла на наклона на стените на склада, за максималните разлики в налягането по неговата повърхност и за положението на неутралната равнина.

На основата на проведените стендови и числени моделни изследвания, част от които са показани в статията, стигаме до съществения извод, че ъгла на наклона на стените на склада α трябва да бъде по-малък от ъгла на естествения откос θ на материала. Това може да се постигне чрез обработка след насипване или чрез намаляване на едрината на складирания материал.

Намаляването на наклона на стените на склада само с 5.5° ($\alpha = \theta - 5,5^\circ$) значително подобрява обтичането му и намалява разликите в налягането по неговата повърхност, резултат от което е по-малкото и по-плиткото проникване на свеж въздух както от наветрената, така и по подветрената стена при равни условия – височина и компактност на възлищата.

Пресечената пирамида представлява лошо обтекаемо тяло, поради многото ръбове на фигурата. Резултатите от опита подсказват необходимостта от търсене на технологични възможности за насипване на фигура с подобро обтичане от вятъра на складовете на възлища с

оглед оптимизирането на формата им, ориентацията им спрямо розата на ветровете.

Литература

- [1] P.S. Jackson, J.C.R. Hunt, Turbulent wind flow over a low hill, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 101/ 1975, pp929-955.
- [2] P.J. Mason, J.C. King, Measurements and predictions of flow and turbulence over an isolated hill of moderate slope, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 11/1985, pp617-640.
- [3] W. Gong, A. Ibbetson, A wind tunnel study of turbulent flow over model hills, *Boundary-Layer Meteorology* 49/1989, pp113-148.
- [4] L.J. Finnigan, M.R. Raupach, E.F. Bradley, G.K. Aldis, A. wind tunnel study of turbulent flow over a two-dimensional ridge, *Boundary-Layer Meteorol.* 50 (1990) 277 317.
- [5] A.D. Ferreira, M.C.G. Silva, D.X. Viegas, A.G. Lopes, Wind tunnel simulation of the flow around two-dimensional hills, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 38 (1991) 109-122.
- [6] G.P. Almeida, D.F.G. Duro, M.V. Heitor, Wake flows behind two-dimensional model hills, *Experimental Thermal and Fluid Science* 7 , 1993, 87-101.
- [7] Hyun Goo Kim, Choung Mook Lee, H.C. Lim N.H. Kyong. An experimental and numerical study on the flow over two-dimensional hills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 66/1997, pp 17-33.
- [8] Mukhammad Ikhwan. Investigation of Flow and Pressure Characteristics around Pyramidal Buildings. PhD Thesis. Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- [9] БДС EN 1991-1-4:2005. Еврокод 1: Въздействия върху строителните конструкции. Част 1-4: Основни въздействия. Натоварване от вятър.
- [10] ГОСТ 27751-88: Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. *Част 5. Прил. 4.* 1988.
- [11] D.Cóstola, B.Blocken, J.Hensen. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*, 2009.
- [12] Саранчук В.И., Х.А.Баев. Теоретические основы самовозгорания угля. М., Недра, 1976.
- [13] <http://www.pdesolution.com>