ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 59 2026 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

DOI: 10.71167/uaceg.2026.590308

Получена: 20.01.2026 г.
Приета: 16.02.2026 г.

ВЛИЯНИЕ НА РАЗСТОЯНИЕТО МЕЖДУ РАЗПОЛОЖЕНИ В КОЛОНА ВЕРТИКАЛНИ ЦИЛИНДРИ ВЪРХУ ВЕТРОВОТО НАТОВАРВАНЕ ПО ТЯХ

Л. Здравков[1]

Ключови думи: *вертикален цилиндър, ветрови поток, разстояние, натоварване, CFD-анализ*

РЕЗЮМЕ

Настоящата статия се явява последна в изследването на автора върху влиянието на разстоянието между вертикалните цилиндрични тела върху ветровото натоварване по тях. Това изследване е породено от липсата на информация по темата, а такава е жизнено необходима, тъй като технологичните съоръжения с малки обеми, като силози и вертикални цилиндрични резервоари, често се изграждат в батерии, на малки разстояния между тях. В резултат от близкото им разполагане натоварването от вятър върху тях е различно от това върху единични съоръжения.

В настоящата версия на европейския стандарт EN 1991-1-4:2005+A1:2010 е разписана методика за определяне на повишеното ветрово натоварване върху разположени в редица тела, перпендикулярно на въздушния поток. Въпросната методика е в зависимост от съотношението между разстоянието a между съоръженията и техния диаметър d, и е валидна при съотношения $a/d > 2{,}5$. Във въпросния европейски стандарт няма предписания как да се определя ветровото въздействие както за по-близко разположени тела, така и върху такива, които са разположени в колона. Въпреки интензивното търсене в достъпната научна литература, авторът не е успял да намери необходимата му информация. Единствено в двете редакции на австралийския и новозеландски стандарт AS/NZS 1170.2 от 2011 г. и 2021 г. са записани няколко прости правила, отнасящи се за близко разположени съоръжения. За да запълни тази празнина, в края на 2023 г. авторът е започнал изследване по темата. Използвайки програма за компютърна симулация на флуиди (CFD), той е създал множество модели на близко

[1] Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, София 1046, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

разположени цилиндрични тела, които са обдухвани от ветрови поток. Първите получени резултати за натоварването върху тела, които са разположени в редица, перпендикулярно на въздушния поток, са представени в статия, публикувана през 2024 г. През настоящата 2026 г. предстои да бъдат публикувани резултатите за натоварването върху разположени в редица тела, чиято ос не е перпендикулярна на въздушния поток.

Настоящата статия е естествено продължение на представеното по-горе изследване и в нея ще бъдат показани резултатите за натоварването върху разположени в колона тела. С нея авторът се надява, че ще запълни цялата липсваща информация по темата.

1. Въведение

Технологичните съоръжения с малки обеми, като силози и вертикални цилиндрични резервоари, често се изграждат в батерии, на малки разстояния между тях, вж. фиг. 1. В резултат от близкото им разполагане, ветровото въздействие върху тях е различно от това върху единични съоръжения. В някои стандарти е посочено как това да бъде отчетено. Например в двете редакции на австралийския и новозеландски стандарт AS/NZS 1170.2 от 2011 г. [1] и 2021 г. [2] е записано, че при близко разположени бункери, силози и резервоари, при които разстоянието между тях е по-малко от 0,1 от диаметъра им, те трябва да бъдат разглеждани като едно тяло за ветровото въздействие. При разстояния, по-големи от два пъти диаметъра им, те следва да бъдат разглеждани като изолирани (отделни) съоръжения. За междинни разстояния следва да се прилага линейна интерполация.

В европейския стандарт за ветрово натоварване от 2005 г., EN 1991-1-4:2005 [3], е казано, че при подредени в редица вертикални цилиндри коефициентът за сила k зависи от посоката на вятъра по отношение на оста на редицата и от съотношението между разстоянието a и диаметърът d, както е показано в табл. 1. В по-късното издание на стандарта от 2010 г., EN 1991-1-4:2005+A1:2010 [4], има промяна при определянето на коефициента k, която е показана в табл. 2.



Фиг. 1. Множество близко разположени силози

Таблица 1. Коефициент *k* за промяна във ветровото въздействие при подредени в редица вертикални цилиндри според EN 1991-1-4:2005, таблица 7.14 [3]

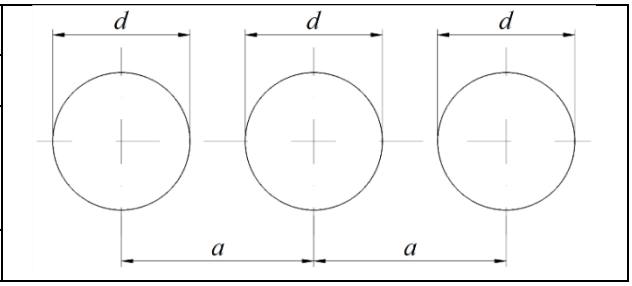
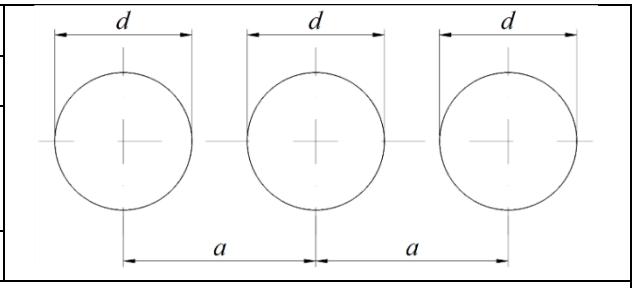
a/d	***k***	
$a/d < 3{,}5$	1,15	
$3{,}5 < a/d < 30$	$k = \frac{210 - \frac{a}{d}}{180}$	
$a/d > 30$	1,00	

Таблица 2. Коефициент *k* за промяна във ветровото въздействие при подредени в редица вертикални цилиндри според EN 1991-1-4:2005+A1:2010, таблица 7.14 [4]

a/d	***k***	
$2{,}5 < a/d < 3{,}5$	1,15	
$3{,}5 < a/d < 30$	$k = \frac{210 - \frac{a}{d}}{180}$	
$a/d > 30$	1,00	
Забележка: За отношение $a/d < 2{,}5$ стойностите на *k* могат да бъдат посочени в националните приложения		

В достъпните за автора национални приложения към европейския стандарт, като БДС EN 1991-1-4:2005/NA:2011[5], DS/EN 1991-1-4 DK NA:2015 [6], NA to BS EN 1991-1-4:2005+A1:2010 [7], NA to CYS EN 1991-1-4:2005 [8], NA to SFS-EN 1991-1-4 [9], NA to SS EN 1991-1-4:2009 [10], няма допълнителна информация. В тях също липсват указания и как да се определя ветровото натоварване върху тела, които са подредени в колона спрямо въздушния поток.

Във вероятно най-цитираното изследване в областта, дело на *Macdonald, Holmes and Kwok* [11], подробно е изследвано как се променя ветровото налягане в отделни точки в средното тяло от пет близко разположени цилиндрични тела. В техните опити, извършени в аеродинамичен тунел, е променяно както разстоянието между телата, така и ъгълът на атака на ветровия поток спрямо оста на редицата тела. За съжаление, тук изследователите не са търсили как се променя общото (сумарното) ветрово натоварване за цялото цилиндрично тяло.

С изключение на изследването по-горе, авторът не е успял да открие в научната литература друга полезна информация за ветровото натоварване върху близко разположени цилиндрични тела. За да запълни тази празнина, от края на 2023 г. той е започнал изследване на обдухвани тела, при които $a/d < 2{,}5$, вж. табл. 1 и 2. Използвайки програма за компютърна симулация на флуиди (CFD), той е създал множество модели на близко разположени цилиндрични тела. Първите получени резултати за ветровото натоварване върху тела, които са разположени в редица, перпендикулярна на въздушния поток, са представени в статия на автора, публикувана през 2024 г. [12]. През настоящата 2026 г. предстои да бъдат представени резултатите за натоварването върху разположени в редица тела, чиято ос не е перпендикулярна на въздушния поток.

Настоящата статия се явява естествено продължение на изследването и в нея ще бъдат представени резултатите за ветровото натоварване върху цилиндрични тела, които са разположени в колона. С нея авторът се надява, че ще запълни цялата липсваща информация по темата.

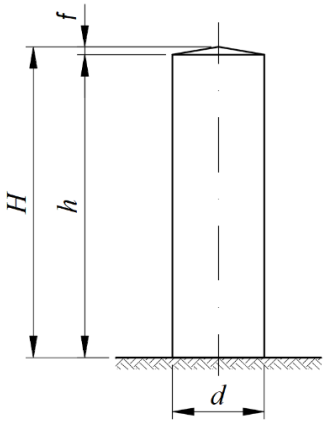
2. Описание на изчислителния модел

Поради липса на аеродинамичен тунел на територията на Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), настоящото изследване за поведението на ветровия поток и породеното от него натоварване върху близко разположени тела е анализирано чрез множество компютърни симулации. Традиционно за УАСГ е използван програмният пакет ANSYS [13] и неговият модул Fluid Flow (CFX). Чрез графичния интерфейс Workbench са създадени множество модели на вертикални цилиндри, които са стъпили на земята. Те имат конични покриви, чиято „стрелка“ f = 50 mm, вж. фиг. 2. Диаметърът на всички цилиндрични тела е еднакъв и той е d = 1 000 mm. В настоящото изследване е варирано с:

а) височините на цилиндричните тела, които тук са две – h = 2 500 mm и 5 000 mm;

б) броя на обдухваните тела – n = 1; 2; 3; 4 и 5, вж. фиг. 3;

в) разстоянието между техните центрове, вж. табл. 1 и 2 – a = 1,1; 1,2; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9 и 10 m.



Фиг. 2. Форма и размери на изследваните тела

В настоящото изследване първо е създадено едно цилиндрично тяло, с формата и размерите, показани на фиг. 2. След това то е мултиплицирано, като всички тела са разположени в колона, на равни разстояния помежду си. Около тях са създадени аеродинамични тунели с форма на паралелепипед, вж. фиг. 4. Стените на симулираните аеродинамични тунели се намират на следните отстояния от телата:

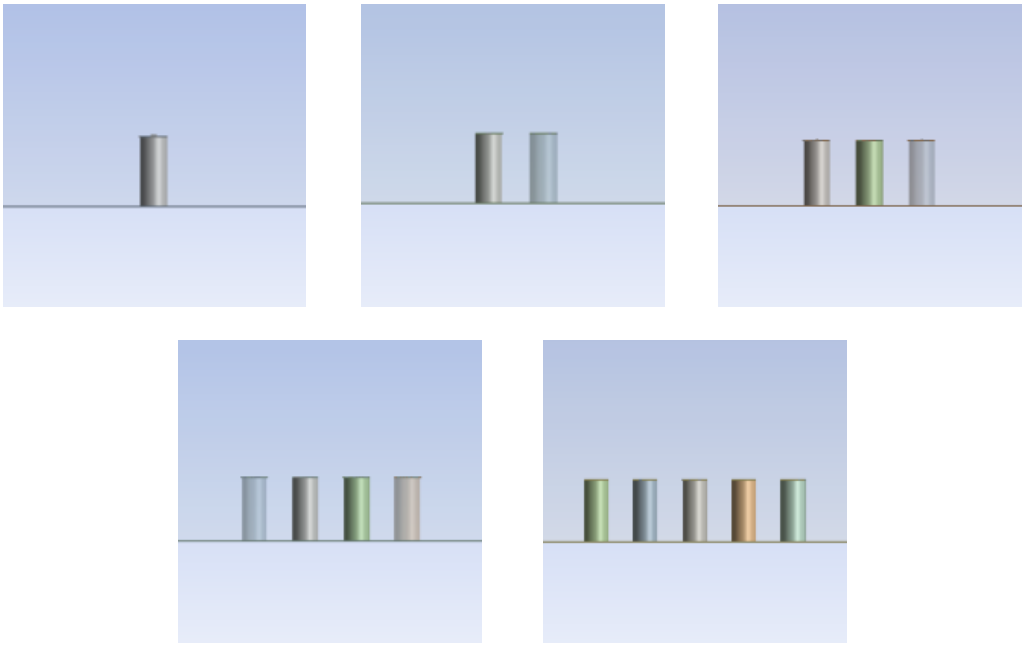
а) вход на флуида – на 30 m;

б) изход на флуида – на 60 m, т.е. телата на цилиндрите са разположени по-близо до входа на аеродинамичния тунел, отколкото до изхода;

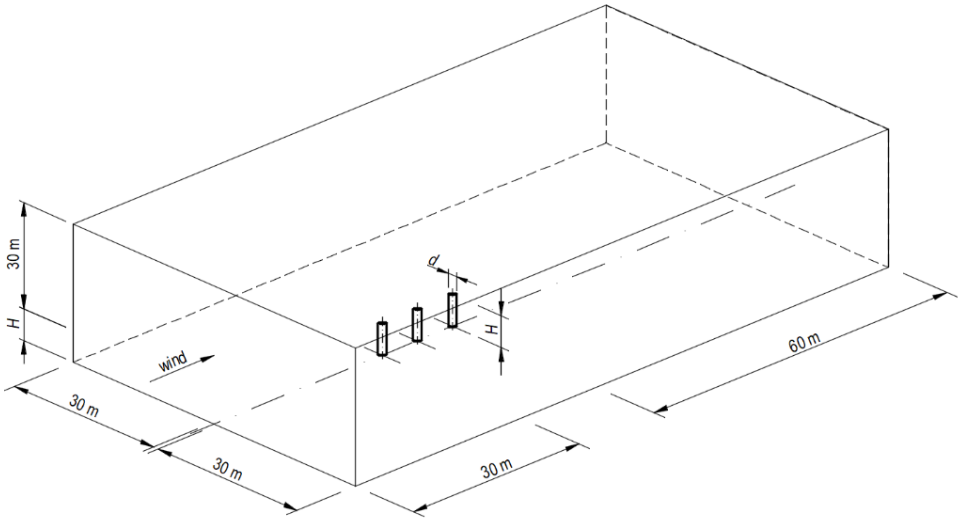
в) вертикални странични стени – на 30 m;

г) „покрив“ на тунела – на 30 m;

д) „дъно“ на тунела – тъй като при настоящата симулация цилиндричните тела са стъпили на земята, разстоянията между тях и „дъното“ е равно на нула.



Фиг. 3. Брой и разположение на изследваните тела



Фиг. 4. Форма и размери на създадените аеродинамични тунели

При определяне на посочените по-горе отстояния е изходено от следните противоречащи си принципи:

а) числените модели не трябва да са ненужно големи – така не е нужна голяма компютърна мощ и се пести изчислително време;

б) стените на виртуалния аеродинамичен тунел не трябва да влияят на въздушния поток непосредствено до изследваните обекти, вж. *Rusev et al.* [14] и *Pantusheva et al.* [15]. Според *Tominaga et al.* [16] тези разстояния не трябва да са по-малки от:

– горната/страничните стени трябва да се поставят на 5H или повече от препятствието, където H е общата височина на телата в настоящото изследване ($H = h+f$, вж. фиг. 2);

– изходът на флуида трябва да бъде поставен най-малко на 10H зад препятствието.

При съоръженията с височина h = 5 000 mm общата им височина ще бъде H = 5 050 mm. С други думи, приетите разстояния до стените на тунела са по-скоро 6H и 12H, вж. фиг. 4, подобно на симулациите на *Hillawaere et al*. [17, 18].

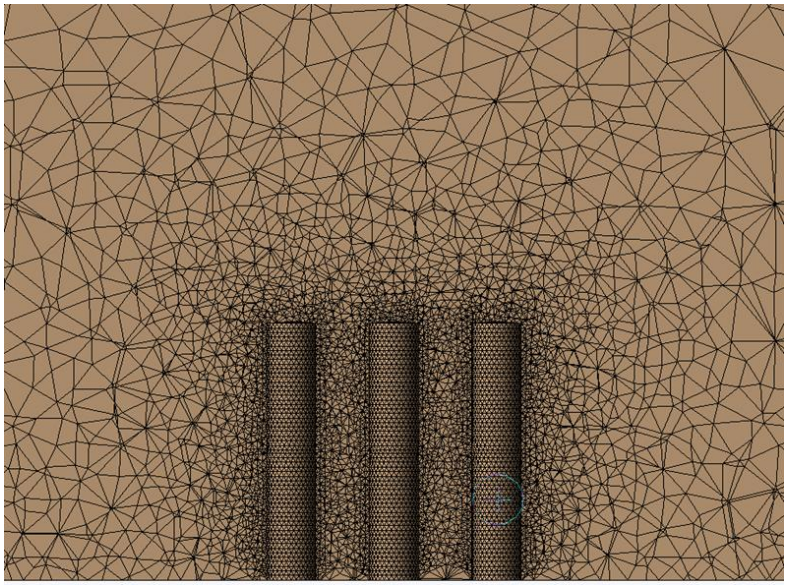
За сведение, препоръките на *Franke et al.* от 2004 г. [19] за минималните отстояния са почти същите като на *Tominaga et al.*, с изключение на разстоянието между препятствието и изхода на флуида. Според *Franke at al.* то трябва да бъде не по-малко от 15H. Авторът е сравнил срязващите сили в основата на телата, получена при симулации съгласно препоръките на *Tominaga et al.* и *Franke et al.* Получената разлика в стойностите на силите в основата на първото (наветреното) тяло е била под 1,32 %. При вътрешните тела е отчетена разлика под 2,22 %. Това е дало основание на автора да приеме, че ако продължи изследването според указанията на *Tominaga et al.*, ще спести изчислително компютърно време, без това да доведе до значима промяна в резултатите.

Тъй като са налични ограничения за минималните отстояния на стените на тунела от изследваните обекти, единствената възможност за избягване на тежки компютърни решения и за спестяване на изчислително време е да се държи сметка за максималния брой на крайните елементи. Т.е. тя трябва да бъде оптимизирана. С тази цел тя е значително сгъстена в зоната около съоръженията, вж. фиг. 5, и е разредена към периферията, както е направено в *Rusev et al.* [20] и *Hui et al.* [21]. Максималният размер на крайните елементи на въздуха е ограничен до:

а) елементи в непосредствен контакт с цилиндричните тела – 100 mm;

б) елементи в непосредствен контакт с „дъното“ на тунела – 500 mm;

в) всички останали елементи – 1 000 mm.



Фиг. 5. Сгъстяване на мрежата около изследваните съоръжения

За да провери коректността на създадената мрежа от елементи, авторът е сгъстил двойно мрежата на елементите на въздуха, т.е. в тестовите модели със сгъстена мрежа максималните размери на елементите са ограничени както следва:

а) елементи в непосредствен контакт с цилиндричните тела – 50 mm;

б) елементи в непосредствен контакт с „дъното“ на тунела – 250 mm;

в) всички останали елементи – 500 mm.

В резултат на това, за модела с едно цилиндрично тяло, високо 5 m, броят на възлите нарасна от 159 421 на 655 881, а на елементите – от 824 468 на 3 407 975. Времето, необходимо на компютър с процесор Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU @ 3.00GHz и 32 GB RAM, за да реши този модел, се промени от 27 min за „рядка“ мрежа на 3 h и 02 min при „гъста“ мрежа.

Сравнявани са стойностите на коефициента за сила *k*, определени по формула (5). Разликата между получените стойности за първото (наветреното) тяло, което е най-силно натоварено, е 0,68 %. При вътрешните тела е отчетена по-значима разлика от 13,1 %. Това е убедило автора, че за отчитане на промяната във ветровото натоварване за първото, най-тежко натоварено тяло, по-голямо сгъстяване на мрежата не е необходимо.

При създаване на мрежата от крайни елементи е използвана опцията “Linear”, в резултат на което възлите в средата на ръбовете им не са запазени. При този подход се намалява необходимото изчислително време. Алгоритъмът при създаването на мрежата е “patch conforming”, т.е. тя стартира от ръбовете и повърхнините на телата. Този подход гарантира „чиста“ мрежа и висока точност на решението. Крайните елементи са тетраедри (“Tetrahedrons”), с по четири възела, които са единствените възможни при използване на алгоритъма “patch conforming”.

Стационарен анализ (Steady state) е използван в модула Fluid Flow (CFX) на ANSYS. В проведеното изследване е приложен стандартен $k-\varepsilon$ модел за симулиране на турбулентността на флуида около съоръженията. Този модел е част от семейството уравнения на *Reynolds-averaged Navier Stokes* (RANS). Според ***Agyropulos and Markatos*** **[22] тези диференциални уравнения имат вида**:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}+\frac{\partial\left(\overline{u_i}\,\overline{u_j}\right)}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial^2 x_j}-\frac{\partial\left(\overline{u_i'}\,\overline{u_j'}\right)}{\partial x_j}, \tag{1}$$

където $\overline{u_i}$ е основната скорост на потока;

$\overline{u_i'}$ – изменението в скоростта;

ρ – плътността на флуида;

ν – кинематичният вискозитет;

t – времето;

$\overline{p}$ – налягането на флуида;

$\overline{u_i'}\,\overline{u_j'}=\tau_{ij}$ – тензор на напреженията на *Reynolds*.

Напреженията на *Reynolds* са представени от ***Markatos*** **[23]** в аналогия с молекулярните вискозни напрежения, **като:**

$$\tau_{ij}=\overline{u_i'}\,\overline{u_j'}=\frac{2}{3}k\delta_{ij}-\nu_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right), \tag{2}$$

където k е кинетичната турбулентна енергия;

$\nu_t = \mu_t/\rho$ – турбулентността или вихровия (кинематичен) вискозитет.

В моделите с едно уравнение ν_t се определя според *Launder and Sharma* [24] чрез израза:

$$\nu_t = C_{\nu 1}\sqrt{kL}\,, \tag{3}$$

в който $C_{\nu 1}$ е безразмерна константа.

При модели с две уравнения, какъвто е използваният в настоящото изследване стандартен $k-\varepsilon$ модел, се използват диференциални уравнения за определяне на характерната скорост и на скалата на дължината L. След това се оценява стойността на параметъра ν_t в посоченото от *Markatos* [23] уравнение:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\,, \tag{4}$$

където $C_\mu = 0{,}09$;

ε – скорост на разсейване на турбулентността.

Описаните по-горе RANS уравнения не отчитат изменение на потока във времето, което според *Baklanov et al.* [25] адекватно представя реалността в аеродинамичните тунели. Т.е. получените с числени методи резултати могат директно да се с равняват с натурно измерените. Приетата в изследването турбулентност има средна (5 %) интензивност. При обтичане на съоръженията от флуида няма процеси на горене и топлинно излъчване. Както и предишното изследване на автора [12], използваният флуид е идеален газ с температура 25 °C. Скоростта му при входа на ограждането е постоянна по височина и е със стойност $v = 25$ m/s. Режимите на потока в областите на входа и изхода са дозвукови, с относително налягане 0 Pa. Посоката на потока е нормална към вертикалните стени и „тавана“ на тунела. Областите на цилиндричните тела са неподвижни стени без грапавини. Повърхността на терена около съоръженията също е идеално гладка, както е в по-ранни изследвания на *Zdravkov* [12, 26].

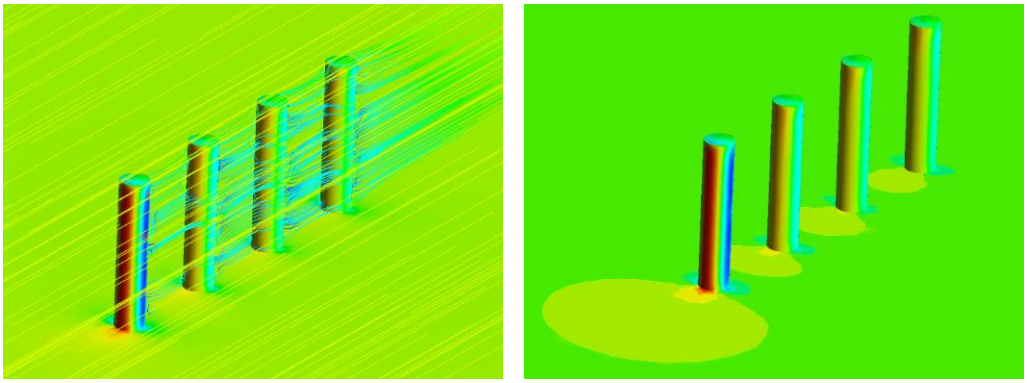
За разлика от изследванията на *Mei Yu et al.* [27], тук основният ветрови поток е хоризонтален, т.е. ъгълът на атака е 0°. Направлението на атакуващия вятър е успоредно на оста на колоната цилиндри.

При движението си ветровият поток обтича съоръженията, вж. фиг. 6*а*, което води до възникване на налягане по техните елементи, вж. фиг. 6*б*. В резултат, в основата на цилиндричните тела се пораждат хоризонтални сили, които лесно могат да бъдат отчетени. Ако се отчите силата в основата на отделен (самостоятелен) цилиндър и се сравни със силите в основите при обединени в група множество тела, чрез формула (5) може да се определи влиянието на разстоянието между тях върху изменението на налягането на потока:

$$k = \frac{F_{h,i}}{F_{h,1}}, \tag{5}$$

където $F_{h,i}$ е отчетената по направлението на ветровия поток хоризонтална сила в основата на i-то цилиндрично тяло от групата;

$F_{h,1}$ – отчетената по направлението на ветровия поток хоризонтална сила в основата на отделен (самостоятелен) цилиндър.



а) обтичане на цилиндричните тела *б) налягане по повърхността на цилиндрите*

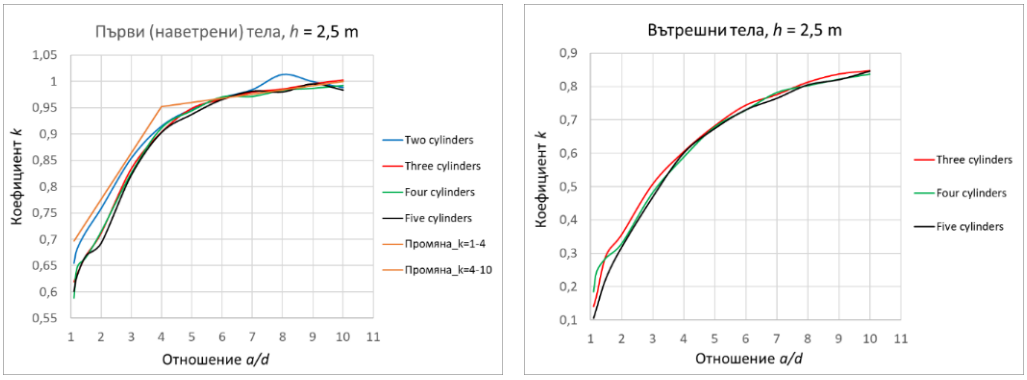
Фиг. 6. Обтичане на цилиндричните тела от ветровия поток и резултантно налягане по повърхнините им

3. Резултати

По време на провеждане на настоящото изследване е получена срязващата сила $F_{h,i}$ в основата на първото (наветреното) и някое от вътрешните цилиндрични тела. За последните тела в колоната близкостоящи тела такава сила не е отчитана, тъй като те са най-слабо натоварени и не представляват интерес от изчислителна гледна точка. По аналогичен начин е получена срязващата сила $F_{h,1}$ в основата на отделно (изолирано) тяло. Определените чрез уравнение (5) стойности на нарастването на ветровото въздействие върху близко разположени цилиндрични тела са показани графично на фиг. 7 и 8, където:

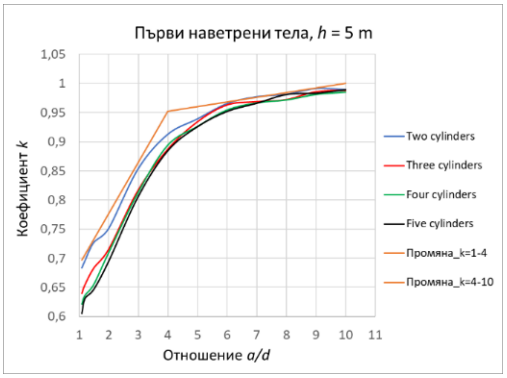
a е осовото разстояние между цилиндричните тела, вж. табл. 1 и 2;

d = 1 000 mm – диаметърът на въпросните тела.

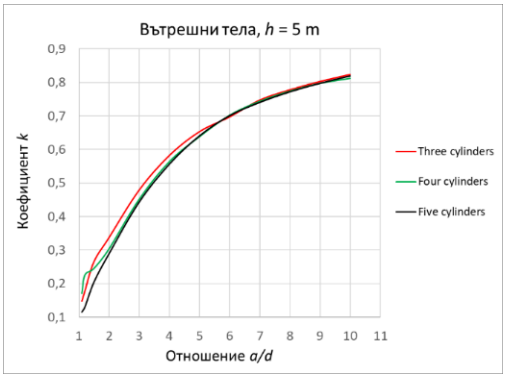


а) при външни тела *б) при вътрешни тела*

Фиг. 7. Подредени в колона цилиндрични тела с височина h = 2,5 m – влияние на разстоянието между тях върху сумарното ветрово натоварване върху тях



а) при външни тела



б) при вътрешни тела

Фиг. 8. Подредени в колона цилиндрични тела с височина h = 5 m – влияние на разстоянието между тях върху сумарното ветрово натоварване върху тях

В рамките на настоящото изследване, където максималният брой на разположените в колона цилиндрични тела е пет, и осовото разстояние между тях е в интервала $a = (1{,}1 \div 10)d$, могат да бъдат направени следните изводи:

а) ветровото натоварване върху разположените в колона цилиндрични тела е по-малко от това върху единично тяло. Това се отнася както за първите (наветрените), така и за вътрешните тела. Въздействието нараства с увеличаване на разстоянието между тях. Авторът счита, че този феномен се дължи на възпрепятстването на свободното движение на въздуха в зоните след изследваните тела, вж. фиг. 9. Тъй като по-високата скорост на потока води до по-малко налягане, потискането му по подветрените повърхнини е предпоставка за по-слабо „смучене“, т.е. за по-малка хоризонтална сила в основата;

б) има разлика във ветровото натоварване върху първото (наветреното) и вътрешните тела в колоната. То е най-голямо при първите тела и по-малко – при вътрешните;

в) при отношение $a/d = 10$ коефициентът k достига следните стойности:

– за първите (наветрените) тела – $k \approx 1{,}0$;

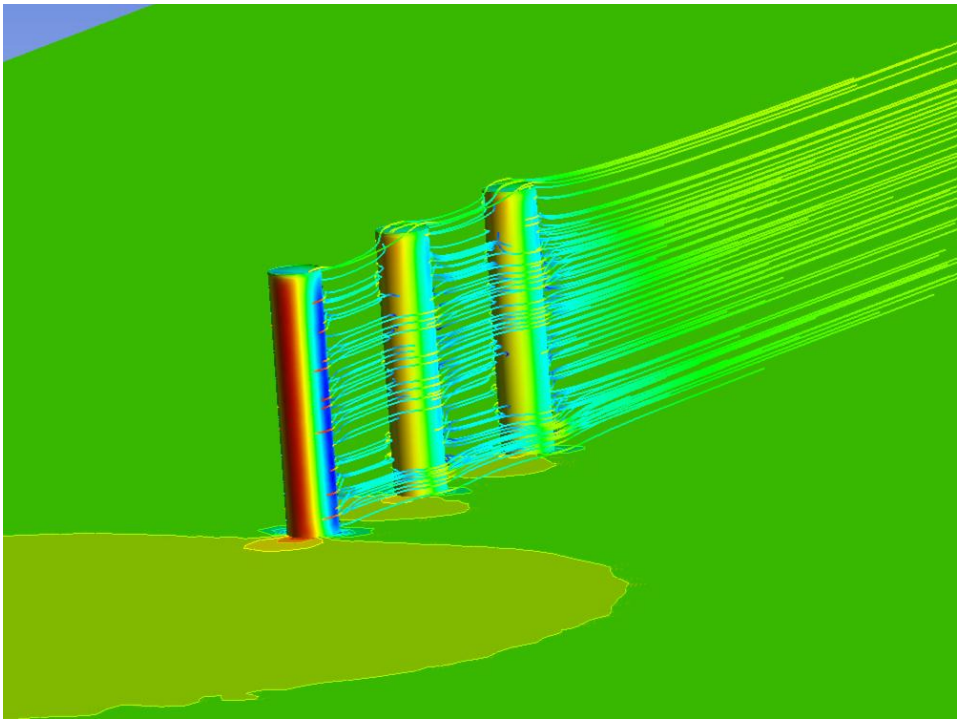
– за вътрешните тела – $k < 0{,}85$;

г) към настоящия момент авторът счита, че при отношение $a/d \geq 10$ не е необходимо да се отчита промяна във ветровото въздействие;

д) на базата на резултатите, получени от настоящото изследване, авторът е извел математически зависимости, чрез които може да се определят стойностите на коефициента k за ветрово натоварване върху най-силно натоварените първи тела. Въпросните изрази са обвивка на получените резултати и са в посока на сигурността, вж. фиг. 7 и 8, линиите в оранжево:

$$k = 0{,}088\frac{a}{d} + 0{,}6 \quad \text{при } 1{,}1 \leq a/d \leq 4; \tag{6}$$

$$k = 0{,}008\frac{a}{d} + 0{,}92 \quad \text{при } 4 \leq a/d \leq 10. \tag{7}$$



Фиг. 9. Възпрепятстване на свободното движение на въздушния поток в зоните след цилиндричните тела

4. Заключение

В европейския стандарт за ветрово натоварване EN 1991-1-4:2005+A1:2010 [4] не е посочена методика как то да бъде определено при отношение $a/d < 2{,}5$, вж. табл. 1 и 2. В различните национални приложения към стандарта, до които авторът е имал достъп [5 – 10], също няма указания по темата. За да запълни тази празнина, авторът първо е проучил достъпната научна литература. След като не е успял да намери необходимата му информация, в края на 2023 г. той е започнал самостоятелно изследване, при което е използвал графичния интерфейс Workbench на ANSYS [13] и неговия модул за компютърна симулация на флуиди Fluid Flow (CFX).

Настоящата статия е завършек на изследването и в нея ще бъдат представени резултатите за ветровото натоварване върху цилиндрични тела, които са разположени в колона. С нея авторът се надява, че цялата липсваща информация по темата ще бъде запълнена.

От сегашното изследване могат да се направят следните изводи:

а) близкото разположение на телата води до намаляване на ветровото въздействие върху всички тях. С увеличаване на разстоянието между тях взаимното влияние намалява, т.е. ветровото въздействие нараства;

б) очаквано, ветровото въздействие върху поставени в колона тела е най-голямо върху първото (наветреното) тяло;

в) авторът счита, че при отношение $a/d \geq 10$ не е необходимо да се отчита промяна във ветровото въздействие.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. AS/NZS 1170.2:2011. Structural Design Actions. Part 2: Wind actions. Australian/New Zealand Standard™, 2011. ISBN 978-0-7337-9805-4.

2. AS/NZS 1170.2:2021. Structural Design Actions. Part 2: Wind actions. Australian/New Zealand Standard™, 2021. ISBN 978-1-7611-3448-7.

3. EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

4. EN 1991-1-4:2005+A1:2010. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. European Committee for Standardization, Brussels, 2010.

5. BDS EN 1991-1-4:2005/NA:2011. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex to BDS EN 1991-1-4:2005. Bulgarian Institute for Standardization, 2011.

6. DS/EN 1991-1-4 DK NA:2015. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex to DS/EN 1991-1-4. Danish Standards Foundation.

7. NA to BS EN 1991-1-4:2005+A1:2010. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex (informative) to BS EN 1991-1-4:2005. BSI Subcommittee B/525/1, 2011.

8. NA to CYS EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex to CYS EN 1991-1-4:2005 (Including AC:2010 and A1:2010). Cyprus Organisation for Standardisation, 2020.

9. NA to SFS-EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex to SFS-EN 1991-1-4. National Building Code of Finland, 2019.

10. NA to SS EN 1991-1-4:2009. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. National annex to SS EN 1991-1-4:2009. Standards Council of Singapore.

11. *Macdonald, P., Holmes, J., Kwok, K.* Wind Loads on Circular Storage Bins, Silos and Tanks. II. Effect of Grouping. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, vol. (34): 77 – 95.

12. *Zdravkov, L.* Influence of the Distance Between Vertical Cylinders Positioned in a Row on the Wind Load on Them. // Challenge Journal of Structural Mechanics, 2024, vol. 10 (3): 101 – 108, ISSN: 2149-8024, DOI: https://doi.org/10.20528/cjsmec.2024.03.003.

13. ANSYS® v.2024 R1. Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA, 2024.

14. *Rusev, I., Tanev, T., Dinev, D.* Numerical study of wind actions on tall buildings with ANSYS CFX and comparison with EN1991-1-4. Proceedings of XII International scientific conference VSU'2012, Sofia, 2012, vol. (1): 83 – 88 (in Bulgarian).

15. *Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P., Petrova-Antonova, D.* Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. // Atmosphere, 2022, vol. 13, 1640, DOI: https://doi.org/10.3390/atmos13101640.

16. *Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., Shirasawa, T.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, vol. (96) (10-11): 1749 – 1761, DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.058.

17. *Hillewaere, J., Degroote, J., Rezayat, A., Vanlanduit, St. et al*. Numerical Investigation of Wind Induced Ovalling Vibrations in Silo Groups. 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, 2013.

18. *Hillewaere, J., Degroote, J., Lombaert, G., Vierendeels, J., Degrande, G.* Wind-structure interaction simulations of ovalling vibrations in silo groups. // Journal of Fluids and Structures, vol. (59): 328 – 350, 2015, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.09.013.

19. *Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A., Krüs, H., Schatzmann, M., Westbury, P., Miles, S., Wisse, J., Wright, N.* Recommendations on the use of CFD in wind engineering. Proc. Int. Conf. Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics, 2004.

20. *Rusev, I., Dinev, D., Tanev, T.* Numerical study of wind actions on nearby tall buildings. Proceedings of International Jubilee Scientific Conference UACEG'2012, Sofia, 2012, pp. 15 – 17 (in Bulgarian).

21. *Hui, Y., Al-Obaidi, A., Mari, T., Gunasagaran, S. Ching, M.* Investigation of the Effect of the Wind Speed on the Aerodynamic and Architectural Design of Tall Buildings. 18th International Engineering Research Conference (Eureca 2022). IOP Publishing, 2023, vol. 2523, 012039, DOI: 10.1088/1742-6596/2523/1/012039.

22. *Agyropulos, C., Markatos, N.* Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. // Applied Mathematical Modelling, 2015, vol. (39): 693 – 732, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.001.

23. *Markatos, N.* The mathematical modelling of turbulent flows. // Applied Mathematical Modelling, 1986, vol. 10 (3): 190 – 220, DOI: https://doi.org/10.1016/0307-904X(86)90045-4.

24. *Launder, B., Sharma, B.* Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disk. Letters in Heat and Mass Transfer, 1974, vol. 1, pp. 131 – 138.

25. *Baklanov, A., Barmpas, P., Bartzis, J., Batchvarova, E. et al.* Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment, edited by J. Franke, A. Hellsten, H. Schlunzen and B. Carissmo. COST Action 732, Brussels, 2007, ISBN: 3-00-018312-4.

26. *Zdravkov, L.* Wind loads on girder bridges. // Challenge Journal of Structural Mechanics, 2022, vol. 8(1): 9 – 16, ISSN: 2149-8024, DOI: https://doi.org/10.20528/cjsmec.2022.01.002.

27. *Yu, M., Liao, H., Li, M., Ma, C., Luo, N., Liu, M.* Study on Static Wind Loading Coefficients of Suspension Bridge, Based on CFD Simulation and Wind Tunnel Test. // Applied Mechanics and Materials, 2011, vol. (66 – 68): 334 – 339, Switzerland, DOI: http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.66-68.334.

INFLUENCE OF THE DISTANCE BETWEEN IN-LINE VERTICAL CYLINDERS ON THEIR WIND LOADING

L. Zdravkov[1]

Keywords: *vertical cylinder, wind flow, distance, load, CFD-analysis*

ABSTRACT

This paper is the latest in the author's research on the influence of the distance between vertical cylindrical bodies on the wind load on them. This research was prompted by the lack of information on the subject, and such information is vitally needed, since technological facilities with small volumes, such as silos and vertical cylindrical tanks, are often built in batteries, at small distances between them. As a result of their close location, the wind load on them is different from that on single facilities.

[1] Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Steel, Timber and Plastic Structures", Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

The current version of the European standard EN 1991-1-4:2005+A1:2010 describes a methodology for determining the increased wind load on bodies arranged in a row perpendicular to the air flow. This methodology depends on the ratio between the distance *a* between the facilities and their diameter *d* and is valid for ratios $a/d > 2{,}5$. However, the standard does not contain any prescriptions on how to determine the wind influence for more closely spaced bodies and those arranged in-line. Despite an intensive search in the available scientific literature, the author was unable to find the information he needed. Only in the two editions of the Australian and New Zealand standard AS/NZS 1170.2 from 2011 and 2021 there are a few simple rules written down for closely spaced facilities. To fill this knowledge gap, in late 2023, the author began research on the subject. Using a computational fluid dynamics (CFD) program, he created multiple models of closely spaced cylindrical bodies that are blown by a wind flow. The first results obtained for the load on bodies that are arranged in a row perpendicular to the air flow are presented in a paper published in 2024. The results for the load on bodies arranged in a row whose axis is not perpendicular to the air flow should be published in the current 2026.

The present paper is a natural continuation of the research and will present the results for the loading on in-line arranged bodies (where the wind flow is parallel to the row axis). The author hopes that this study will successfully bridge the remaining knowledge gaps on the topic.