
Gaisro sukeltų karštų dujų tėkmių modeliavimas aukštose šachtose

Arūnas Sirvydas,
Povilas Poškas

Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas

Analizuojant galimus gaisrus atominėse elektrinėse ir kituose energetiniuose objektuose, vienas svarbių analizės objektų yra aukštos šachtos, kuriose neretai būna išdėstyti kabeliai ir kitokios jungiančios sistemos. Šiame darbe pateikiama termogravitacijos bei slėgio jėgų sukeltų karštų dujų tėkmių tokiose aukštose vertikaliose šachtose analizė. Tai būtų dūmų plitimo modelis liftų, ventiliacijos, kabelių šachtose, taip pat aukštuose pastatuose gaisro atveju. Pagrindinis tikslas buvo nustatyti temperatūros pasiskirstymą pagal šachtos aukštį, rezultatus palyginti su literatūroje [1] pateikiamais eksperimentiniais duomenimis ir išanalizuoti karšto oro tėkmės aukštose šachtose ypatumus. Išanalizuoti keli šachtos modeliai, o karštų dujų įtekėjimo į šachtą greičiai buvo keičiami plačiame diapazone. Skaičiavimuose naudotas kompiuterinių programų paketas *FLUENT*. Gauti rezultatai rodo, kad karštos dujų judėjimas (kilimas dėl termogravitacijos) pagal sieną yra pagrindinis transportavimo mechanizmas, sąlygojantis karštų dujų plitimą nuo įtekėjimo link ištekėjimo srities. Recirkuliacija ir sąlyginai šaltų dujų pasiurbimas vyrauja esant dideliems Grashofio skaičiams įtekėjime, o didesni Reinoldso skaičiai (mažesnis $Ri = Gr/Re^2$) skatina didesnę tėkmių maišymąsi šachtoje. Atlikus analizę buvo nustatytos sąlygos, kurioms esant aukštose šachtose su natūralia ventiliacija viršuje būtų pasiektos kuo žemesnės vidutinės temperatūros ir greičiau pašalintos karštos dujos, o tai aktualu gaisro patalpoje metu.

Raktažodžiai: karštos dujos, aukšta šachta, laminarinis tekėjimas, termogravitacijos ir slėgio jėgų poveikis, temperatūros ir greičių laukai

1. ĮVADAS

Šiuo metu gana plačiai ištirtas gaisro sukeltų karštų dujų judėjimas pastatuose ir patalpose, esant nedideliams aukščio ir pločio santykiams. Dūmų ir kitų degių medžiagų sklidimas aukštuose pastatuose ar patalpose, tokiose kaip aukštos vertikalios šachtos, kurios vaidina svarbų vaidmenį aukštų pastatų gaisruose, dar nėra labai nuodugnai ištirtas [2, 3]. Kad sumažintų dūmų koncentraciją ir temperatūrą, patalpose prie lubų įrengiamos ištraukiamosios ventiliacinės angos, kurios atidaromos, kai degimo produktai pasiekia patalpos lubas (tai gali būti ir paprasčiausia mechaninė horizontali ventiliacija). Tačiau šių angų išdėstymas tam tikrose patalpos vietose, pagrįstas nuodugniais fluido judėjimo skaičiavimais, gali labai padėti išspręsti kai kuriuos tėkmių judėjimo klausimus ir palengvinti ugniagesių darbą gaisro atveju, o dar greitesni automatinio reagavimo metodai, kurie taip pat pagrįsti fluido judėjimo skaičiavimais.

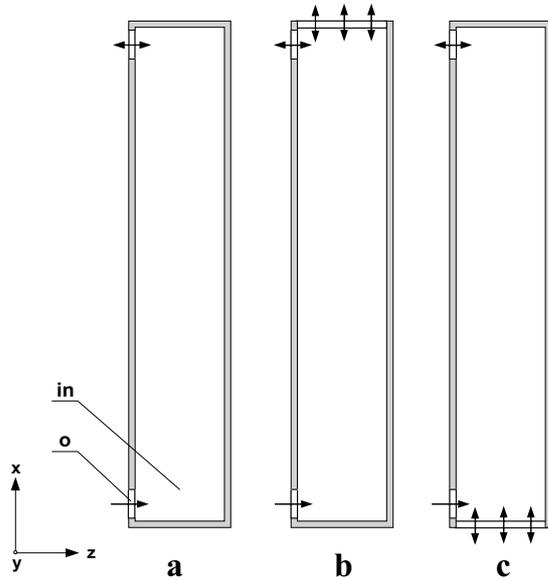
Darbe [1] buvo atlikti eksperimentiniai karštų dujų tėkmių tyrimai keliuose vertikalios šachtos ($x/d_c = 6$) modeliuose (uždarytas viršus ir uždaryta apačia; atidarytas viršus ir uždaryta apačia bei uždarytas viršus ir atidaryta apačia). Minėtame darbe mišrios konvekcijos parametras – Ričardsono skaičius kito nuo 0,04 iki 1. Daugiausia dėmesio buvo skirta temperatūros pasiskirstymui šachtoje pagal šachtos aukštį esant įvairioms įtekančios tėkmės temperatūroms ir greičiams.

Šiame darbe skaitmeniniu būdu taip pat analizuoti trys šachtos modeliai ir visas sąlygas buvo stengiamasi išlaikyti tokias pat, kaip ir [1] darbe. Tačiau čia daugiausia dėmesio skirta ne tik temperatūros pasiskirstymui pagal šachtos aukštį esant įvairiems jos modeliams, bet ir tėkmės charakteristikoms – greičių laukams, sukurių susidarymui.

2. ŠACHTOS MODELIAI

Šiame darbe, kaip ir darbe [1], buvo nagrinėjami trys šachtos modeliai 1 (a–c) pav., o visas sąlygas

stengtasi išlaikyti tokias pat, kaip ir minėtame eksperimentiniame darbe, kad būtų galima palyginti gautus rezultatus. Fluidu buvo pasirinktas oras. Jei jį palygintume su degimo metu susidarančiais produktais – dūmais, tai pastebėtume, kad dūmų tankis labai nedaug skiriasi nuo oro tankio esant toms pačioms sąlygoms (tai reiškia, kad dūmai modelyje judėtų labai panašiai kaip ir oras).



1 pav. Šachtos modeliai: uždarytas viršus ir uždaryta apačia (a), atidarytas viršus ir uždaryta apačia (b), uždarytas viršus ir atidaryta apačia (c). o žymi šachtos įtekėjimo angos skerspjūvį, in – įtekėjimo į šachtą skerspjūvį

Karštas oras įteka per angą, esančią apatinėje šachtos dalyje, į šachtos erdvę tam, kad būtų galima modeliuoti tėkmės esant tikriems gaisrams. Įtekėjimo ir ištekėjimo angos yra lygiagrečios galinei šachtos sienelei ir abi tokių pat matmenų, t. y. 8 × 8 cm. Šachtos ilgis ir plotis atitinkamai po 25 cm, o aukštis 6 kartus didesnis, t. y. 150 cm ($x/d_e = 6$). Visi šachtos modelio paviršiai buvo iš organinio stiklo ($\lambda \approx 0,19 \text{ W/(m K)}$), kurio storis, kaip ir darbe [1], lygus 6,4 mm.

Visos modelių parametrų kitimo ribos parodytos lentelėje. Aplinkos temperatūra palaikoma lygi 22°C.

Gaisro metu patalpoje padidėja slėgis, o tai priverčia judėti degimo produktus iš degančios patalpos į kitas patalpas arba į lauką. Šiuo atveju tėkmės greičiai įtekėjimo angoje buvo keičiami, kaip pateikta 1 lentelėje, laikantis prielaidos, kad slėgis, susidarantis degančioje patalpoje, priverčia degimo produktus nedideliu greičiu judėti į modeliuojamą šachtą. Įtekėjime greitį u_0 laikėme pastoviu ir modeliavome tokiam atvejui, kai procesai, vykstantys šachtose, neturi įtakos įtekėjimo greičiui, o veikia pasiurbiamo oro debitą per atidarytas šachtos grindis, lubas arba ištekėjimo angą.

Šioje lentelėje Grashofio kriterijus (Gr_0) skaičiuotas būdingais dydžiais laikant įtekėjimo angos aukštį ir įtekančio srauto temperatūrą bei įtekėjimo angos ir išorės temperatūrų skirtumą ΔT , o Gr_{inf} skaičiuotas būdingu dydžiu laikant šachtos ekvivalentinį skersmenį ir tą patį temperatūrų skirtumą ΔT .

Reinoldso kriterijus (Re_0) skaičiuotas būdingais dydžiais laikant įtekėjimo angos ekvivalentinį skersmenį bei tėkmės greitį įtekėjimo angoje, o Re_{in} skaičiuotas būdingu dydžiu laikant šachtos ekvivalentinį skersmenį ir tėkmės greitį įtekėjime į šachtą.

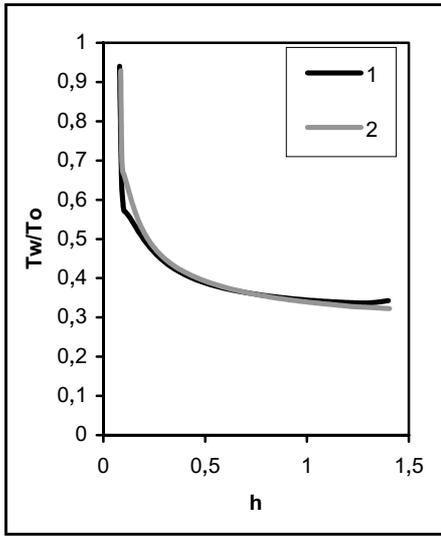
Termogravitacijos jėgų poveikiui įvertinti mišrios konvekcijos atveju naudojamas Ričardsono kriterijus – $Ri_{inf} = Gr_{inf} / Re_{inf}^2$. Jis rodo laisvosios ir priverstinės konvekcijos parametrų santykį. Šiuo atveju tas santykis, panašiai kaip ir darbe [1], kito nuo 0,3 iki 1.

3. SKAITINIŲ TYRIMŲ METODIKA

Nagrinėjamas skaitinio modeliavimo objektas – vertikali plokščia šachta. Pradžioje naudojantis programa *GAMBIT* buvo sukurta trimatės šachtos geometrija ir du tinkleliai. Pirmojo tinklelio dydis $N_x \times N_y \times N_z = 150 \times 25 \times 25$, o antrasis tinklelis buvo dvigubai tankesnis, t. y. jo dydis $N_x \times N_y \times N_z = 300 \times 50 \times 50$. Po to tinkleliai eksportuoti į programą *FLUENT* [4] atlikti skaičiavimams. *FLUENT* – tai šiuolaikinė kompiuterinė programa, skirta fluidų tekėjimui ir šilumos mainams sudėtingose dvimatėse ar trimatėse geometrijose modeliuoti. Norint įsitikinti sudaryto tinklelio tinkamumu, atliktas šachtos modeliavimas tiek su pirmu, tiek su antru tinkleliu esant didžiausiam Re skaičiui įtekėjime. Šiuo atveju buvo pasirinktas vienas palyginamųjų dydžių – sienelės temperatūros su įtekančios

Lentelė. Modelių parametrų kitimo ribos							
Modelis	u_0 m/s	Re_0	T_0 °C	Gr_0	T_{inf} °C	Gr_{inf}	Re_{inf}
I	0,034	132	80	$4,26 \cdot 10^4$	32,62	$1,88 \cdot 10^6$	1370
	0,068	254	80	$4,26 \cdot 10^4$	38,12	$1,73 \cdot 10^6$	1882
	0,089	345	80	$4,26 \cdot 10^4$	40,60	$1,69 \cdot 10^6$	2065
II	0,034	132	80	$4,26 \cdot 10^4$	32,40	$1,88 \cdot 10^6$	1400
	0,068	254	80	$4,26 \cdot 10^4$	37,45	$1,74 \cdot 10^6$	1982
	0,089	345	80	$4,26 \cdot 10^4$	40,15	$1,69 \cdot 10^6$	2101
III	0,024	91	80	$4,26 \cdot 10^4$	31,80	$1,88 \cdot 10^6$	1340
	0,068	254	80	$4,26 \cdot 10^4$	37,84	$1,74 \cdot 10^6$	1476
	0,1	454	80	$4,26 \cdot 10^4$	39,89	$1,69 \cdot 10^6$	1922

tėkmės temperatūra santykio kitimas pagal šachtos aukštį. Šios priklausomybės kitimas esant tiek tankesniam, tiek retesniam tinkleliui parodytas 2 paveiksle, kuriame matyti, kad skaičiavimo rezultatai skiriasi labai nežymiai. Santykinė paklaida tarp šių kreivių parodė, kad šachtos apatinėje ir viršutinėje dalyse jos išsiskiria apie 12%, o vidurinėje tik apie 3%. Buvo lyginti ir greičių laukai abiem tinkleliams. Palyginimas parodė, kad vaizdas šachtoje (tai, kas labiausiai domina), tiek skaičiuojant tankesniu, tiek retesniu tinkleliu, vizualiai nesiskiria, nors santykinė paklaida tarp skaitinių reikšmių daugiausiai siekia 20%.



2 pav. Sielės temperatūros santykio su įtekančios tėkmės temperatūra kitimas pagal šachtos aukštį priklausomai nuo tinklelio dydžio. 1 – retesnis tinklelis, 2 – tankesnis tinklelis

Modeliavimui buvo naudotas retesnis tinklelis, nes nukrypimai nėra labai dideli, palyginti su tankesniu tinkleliu, be to, skaičiavimai atliekami daug sparčiau, t. y. sugaištama mažiau laiko.

Mišrios konvekcijos uždaviniams, kuriuose fluido fizikinių savybių kitimas dėl temperatūros kitimo yra mažas, tikslinga naudoti Businessko prielaidas, kurios tankio reikšmę laiko pastovia visose sprendžiamose lygtyse, išskyrus termogravitacijos narį judesio lygtyje. Tačiau mūsų nagrinėjamą uždavinį tiksliau buvo spęsti naudojant kintamas fluido fizikines savybes, nes fluido temperatūrų kitimai modelyje pakankamai dideli.

Taigi programa *FLUENT* nagrinėjamo modelio atveju sprendžia tokias pagrindines trimačio stacionaraus tekėjimo lygtis.

Judesio lygtį atskiroms greičio komponentėms (u_x , u_y ir u_z):

$$\begin{aligned} \rho u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \\ & + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] - \rho g_x; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = & \\ & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = & \\ & -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Kaip matyti, u_x greičio komponentės lygtyje yra papildomas narys ρg_x . Šis narys įvertina termogravitacijos jėgų poveikį (nes x ašis yra išilginė modelio ašis).

Energijos lygtį:

$$\begin{aligned} \rho u_x \frac{\partial h}{\partial x} + \rho u_y \frac{\partial h}{\partial y} + \rho u_z \frac{\partial h}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Tėkmės nepertraukiamumo lygtį:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Šilumos laidumo per sienelę lygtį:

$$\frac{1}{c_p \rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = 0. \quad (6)$$

Modeliuojant programa *FLUENT* reikia numatyti šilumos atidavimo koeficientus nuo šachtos paviršių.

Šilumos atidavimo koeficientas dėl natūralios konvekcijos nuo vertikalios šoninio šachtos paviršiaus randamas iš kriterinės lygties [5]:

$$Nu = 0,13Ra^{1/3}. \quad (7)$$

Sąlygojantis geometrinis dydis *Nu* ir *Ra* kriterijuose yra šachtos aukštis.

Šilumos atidavimo koeficientas dėl natūralios konvekcijos nuo horizontalaus šachtos paviršiaus randamas iš kriterinės lygties [5]:

$$Nu = 0,13Ra^{1/4}. \quad (8)$$

Sąlygojantis geometrinis dydis panašumo kriterijuose šiuo atveju yra šachtos skerspjūvio ploto ir perimetro santykis.

4. SKAITINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Kadangi modeliuojama šachta yra trimatė, tai norint aiškiai pamatyti temperatūros, greičių ir kt. dydžių laukus, šachta, jau po modeliavimo, buvo „perpjauta“ išilgai per vidurį (t. y. ten, kur tikėtinos didžiausios dominančių parametru reikšmės) ir reikalingi dydžiai stebimi pjūvio plokštumoje.

4.1. Pirmasis šachtos modelis

Pirmasis šachtos modelis 1(a) pav. – uždarytas viršus ir uždaryta apačia. Apskaičiuoti temperatūros laukai pateikti 3 pav. kaip izotermos. Eksperimentiniame darbe [1] teigiama, kad karšta dujų tėkmė formuojasi prie sienelės virš įtekėjimo angos. Modeliavimas irgi parodė tuos pačius rezultatus – karštų dujų tėkmė susiformuoja prie sienelės virš įtekėjimo angos ir ten susidaro dideli temperatūros gradientai, matomi kaip tamsi daugelio susiliejusių izotermų kontūrų sritis. Esant didesniai Reynoldso skaičiui, čia, kaip pabrėžiama ir [1] darbe, matyti, kad karštų dujų tėkmė darosi šiek tiek storesnė, tai reiškia, kad ji labiau maišosi. Esant didesniams oro tėkmės įtekėjimo į šachtą greičiams, „šaltas“ fluidas, esantis apatinėje šachtos dalyje, yra labiau šildomas dėl konvekcijos, todėl matyti izotermų sutankėjimas 3 pav., o dėl termogravitacijos susidaro recirkuliaci-

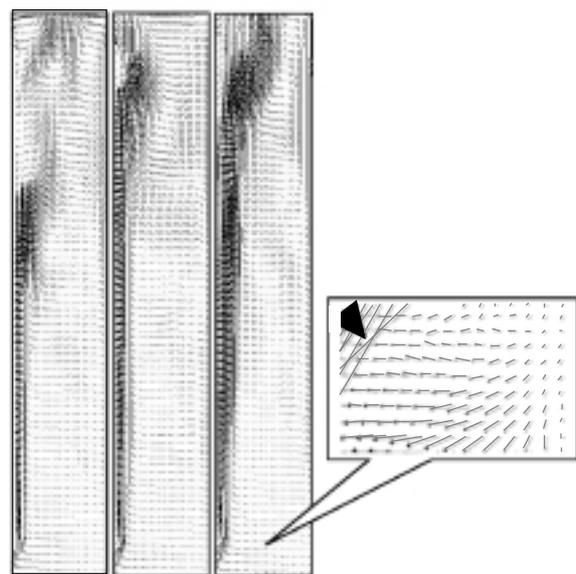


Re₀: 132 254 345

3 pav. Izotermų pasiskirstymas šachtos I modelyje esant skirtingiems Reynoldso skaičiams įtekėjimo angoje

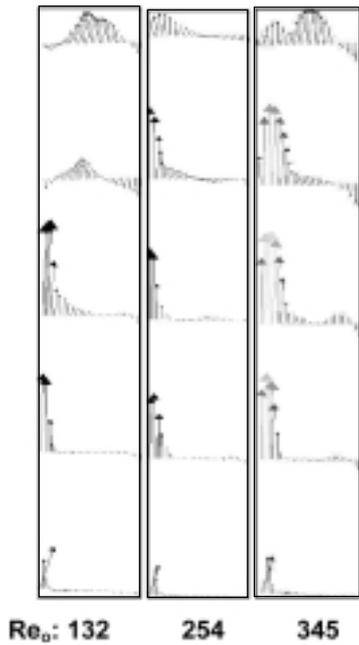
jos sritis, kuri taip pat padidina konvekcinius šilumos mainus šioje modelio dalyje.

Įtekėjusios į šachtą karštos dujos dėl tankių skirtumo sparčiai kyla aukštyn. Kaip matyti iš greičių laukų (4 pav.) ir greičių profilių (5 pav.), maždaug iki pusės šachtos aukščio (kai *Re* įtekėjime lygus 132) tėkmė kyla pagal priekinę sienelę, jo greitis didėja, o viršutinėje šachtos dalyje ima mažėti. Tėkmė, pasiekusi viršutinę šachtos dalį, dėl ištekėjimo angos efektų pradeda atitrūkinėti nuo sienelės. Kadangi srauto temperatūra dar nėra žema, ji toliau kyla aukštyn, vėsta ir atsimuša į viršutinę šachtos



Re₀: 132 254 345

4 pav. Greičių laukai šachtos I modelyje



5 pav. Greičių profiliai šachtos I modelyje pagal aukštį nuo įtekėjimo iki ištekėjimo angos

sienelę. Tėkmė šachtos lubas pasiekia dar turėdama nemažą energiją (greitį) (žr. 4 pav.) ir ten pasidalija į dvi dedamąsias – prie priekinės ir prie galinės sienelių. Oro tėkmė prie galinės sienelės dar dėl turimo greičio ir dėl tankių skirtumo sudaro sūkurį.

Kadangi priekinės sienelės viršuje yra anga, kuri susisiekiama su sąlyginai šaltu aplinkos oru, tai šachtos viršuje prie priekinės sienelės esantis oras dar sparčiau aušinamas (nes šiltas šachtos oras nors ir labai silpnai, tačiau pasiurbia aplinkos orą per ištekėjimo angos apatinę dalį), leidžiasi žemyn ir, nusileidęs iki maždaug 1/3 šachtos aukščio nuo viršaus, susiduria su karšta bekylančia tėkme. Taigi dėl termogravitacijos jėgų poveikio prie sienelės, kurioje yra ištekėjimo anga, susidaro sūkurys.

Tuo tarpu tėkmė prie galinės sienelės dar dėl turimo greičio sudaro sūkurį. Dalis tėkmės sukasi sūkuryje, o dalis, esanti prie galinės sienelės, aušta ir pagal ją leidžiasi žemyn. Nuo šachtos vidurio besileidžiančios tėkmės greitis pasidaro labai nedidelis, nes toje šachtos dalyje oras jau yra beveik vienodos temperatūros. Tose vietose, kur besileidžiančios dujos susiduria su karštesnėmis kylančiomis dujomis, susidaro tekėjimo nestabilumas – keli nedideli sūkurukai. Kiek didesnis sūkurys (4 pav.) susiformuoja šachtos apačioje, nes čia susidaro recirkuliacijos sritis ir karšta tėkmė pasiurbia atvėsusias, besileidžiančias žemyn, dujas.

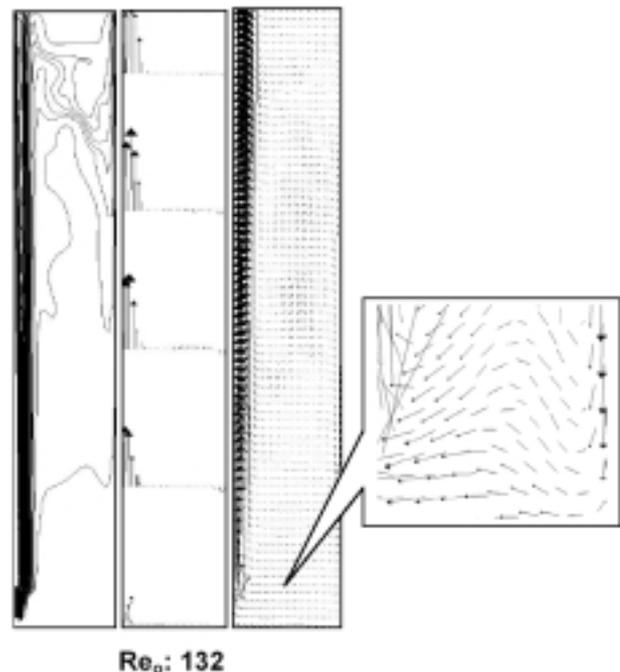
Dujoms į šachtą įtekant didesniu greičiu Ričardsono skaičius mažėja ir galima pastebėti, kad tai sukelia didesnį tėkmės maišymąsi.

Šiuo atveju karštos dujos kaupiasi viršutinėje šachtos dalyje ir jau per visą ištekėjimo angos skerspjūvį išteka išorėn. Tėkmė, esanti prie galinės sienelės, aušta ir dėl tankių skirtumo pagal ją leidžiasi žemyn. Kaip matyti 5 pav., tėkmė nežymiai greitėja, o pasiekusi tam tikrą atstumą nuo viršaus pradeda atplyšinėti nuo sienelės. Prie priekinės sienelės bekylančios šiltos dujos pasiurbia ją, pašildo ir vėl priverčia kilti aukštyn, t. y. susidaro sūkurys apatinėje šachtos dalyje (4 pav.).

4.2. Antrasis šachtos modelis

Antrasis šachtos modelis 1(b) pav. – atidarytas viršus ir uždaryta apačia. Tokios pat įtekėjimo sąlygos buvo numatytos ir šiam šachtos modeliui. Nagrinėjamu atveju karšta tėkmė gali lengviau pasišalinti iš šachtos, palyginti su pirmuoju jos modeliui. Kaip skerspjūvyje pasiskirsčiusios izotermos, greičių profiliai ir greičių laukai, kai $Re_0 = 132$, parodyta 6 paveiksle. Iš rezultatų matyti, kad karštų dujų tėkmė pagal sienelę yra šiek tiek platesnė negu esant I modeliui. Tai irgi akcentuojama darbe [1]. Šioks toks nestabilumas atsiranda šachtos viršuje, kur karšta tėkmė susitinka su „vėsiu“ aplinkos oru. Šilta tėkmė greičiau aušinama, krinta jos temperatūra, todėl matomas izotermų sutankėjimas.

Skaičiavimai esant didesniems Reinoldso skaičiams įtekėjimo angoje parodė, kad maišymasis stiprėja ir šachtoje izotermos pradeda retėti. Greičių vektoriniai ištekėjimo angoje parodė, kad aplinkos oras per ją yra pasiurbiamas ir kartu su karšta tėkme



6 pav. Izotermų, greičių profilių ir greičių laukų pasiskirstymas šachtos II modelyje, kai $Re_0 = 132$

išteka per atvirą šachtos stogą. Tėkmė vis dėlto maišosi ir šiuo atveju, tačiau šilumos perdavimas sienoms nėra didelis dėl labai didelio šilumos pašalinimo viršuje. Vidutinė šachtos oro temperatūra šiuo atveju, kaip ir darbe [1], buvo žemesnė už temperatūrą I modelio atveju todėl, kad šachta nėra izoliuota nuo šalto aplinkos oro. Šis šachtos modelis ypatingas tuo, kad karšta tėkmė nevaržomai gali ištekėti per šachtos lubas, o ir tekėjimo nestabilumą (sūkurių) pastebėta mažiausiai iš visų analizuotų konfigūracijų.

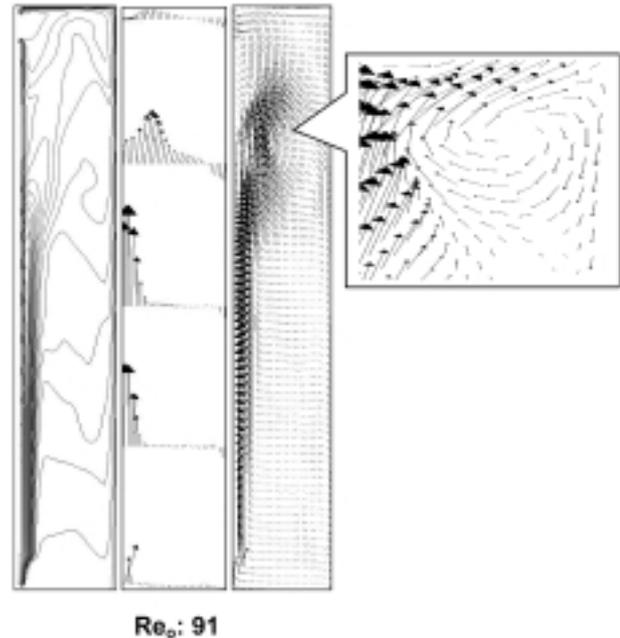
4.3. Trečiasis šachtos modelis

Trečiasis šachtos modelis 1(c) pav. – uždarytas viršus ir atidaryta apačia. Šiuo atveju, panašiai kaip ir esant I modeliui, šachtoje susidarė didesnė recirkuliacija, palyginti su atveju, kai atidarytas šachtos viršus. Izotermų, greičių profilių ir greičių laukų pasiskirstymas, kai $Re_0 = 91$, parodytas 7 paveiksle. Matyti, kad apatinė šachtos dalis vėsesnė, palyginti su viršutine, todėl, jog aplinkos oras yra pasiurbiamas per atviras šachtos grindis ir iš karto aušina įtekančią tėkmę. Izotermos šiek tiek atitolsta nuo sienelių pabrėždamos šilumos nuostolius per jas. Oras yra praktiškai izotermiškas šachtos viršutinėje dalyje.

Padidinus Reinoldso skaičių įtekėjime, karštų dujų sluoksnio storis šachtoje, viršutinėje dalyje, kaip teigiama ir darbe [1], padidėja. Šiluma prarandama gana greitai, todėl maždaug pusė šachtos tampa beveik izotermiška. Skaičiavimai parodė, kad didinant Reinoldso skaičių šachta gauna daugiau šilumos, o izotermų išsidėstymas pabrėžia, jog tėkmės kryptis – per ištekėjimo angą išorėn.

Bendruoju atveju didinant Reinoldso skaičių šachtos oro temperatūra, kaip ir darbe [1], didėdavo dėl to, kad tėkmė mažiau atvėsdavo ir labiau šildydavo šachtą. Šiuo nagrinėjamu atveju vidutinė šachtos oro temperatūra buvo žemesnė negu esant I, tačiau aukštesnė negu esant II modeliui, o tai visiškai sutampa su eksperimento [1] rezultatais.

Nagrinėjamu atveju tekėjimo nestabilumai panašūs kaip ir esant I šachtos modeliui. Tačiau šis atvejis ypatingas tuo, kad įtekančios dujos pasiurbia dalį vėsaus aplinkos oro pro šachtos apačią, šiek tiek atvėsta, tačiau tankių skirtumas dar pakankamas, kad užtikrintų tėkmės kilimą aukštyn (7 pav.). Šachtos viršuje, prie priekinės sienelės, tėkmė neturi daug energijos, todėl beveik nesugeba ištekėti per ištekėjimo angą išorėn. Labiausiai srauto ištekėjimas iš šachtos pastebimas per atviras jos grindis. Šiuo atveju (kai $Re_0 = 91$) tėkmė per ištekėjimo angą pasiurbia išorės orą ir vėsta (izotermos nuo ištekėjimo angos ištįsta į šachtos erdvę). Šilta tėkmė šachtos viršuje liečiasi su sienelėmis, per kurias šiluma taip pat nukreipiama išorėn, todėl vėsta ir pagal ga-



7 pav. Izotermų, greičių profilių ir greičių laukų pasiskirstymas šachtos III modelyje, kai $Re_0 = 91$

linę sienelę leidžiasi žemyn. Dalis besileidžiančios tėkmės, esanti toliau nuo galinės sienelės, susiduria su kylančia prie priekinės sienelės tėkme. Susidūrimo zonoje abi tėkmės maišosi, atvėsusį pašyla ir su pagrindine tėkme kyla aukštyn, t. y. susidaro recirkuliacija prie priekinės sienelės (7 pav.). Tėkmė prie galinės sienelės leidžiasi žemyn, apatinėje šachtos dalyje pasiurbiamas įtekančio oro ir toje zonoje sudaro sūkurį.

Kai Re skaičius įtekėjime didesnis, tėkmė jau nepasiurbia aplinkos oro per ištekėjimo angą, t. y. iš šachtos oras šiuo atveju per ištekėjimo angą išteka į aplinką. Dujos apatinėje šachtos dalyje nespėja taip greit atvėsti, kaip pirmuoju atveju, ir sparčiau kyla aukštyn. Prie priekinės sienelės pastebimas tėkmės atitrūkimas, viršutinėje dalyje ji praktiškai išnyksta, nes dujos ten yra vėsesnės, jų judėjimo greitis mažesnis ir abi tėkmės susilieja. Viršuje tėkmė atsimuša į šachtos lubas, dėl turimos energijos sudaro sūkurį, o tėkmės dalis, esanti prie galinės sienelės, aušta ir pagal ją leidžiasi žemyn. Kadangi šachtos apačia yra atvira, tai besileidžiančios dujos ir šiuo atveju išteka į aplinką.

Nagrinėtu atveju vidutinė šachtos oro temperatūra buvo žemesnė negu esant pirmajam, tačiau aukštesnė nei esant antrajam modeliui. Tai taip pat atitinka eksperimento [1] rezultatus.

5. IŠVADOS

Išanalizavus termogravitacijos sukeltų karštų oro tėkmių judėjimą vertikaliose šachtose esant skirtingiems jos modeliams, galima padaryti šias išvadas.

1. Šachtos modelyje, kai uždarytas viršus ir uždaryta apačia, labiausiai pastebimi tėkmės sukūriai susidarė viršutinėje jos dalyje. Kai Reinoldso skaičius įtekėjime didžiausias (Ri mažiausias), daugiausia susidarė smulkių sukūrių. Reinoldso skaičiui įtekėjime didėjant (Ri mažėjant) smulkūs sukūriai praktiškai išnyksta, o jų vietoje susidaro mažiau, bet didesni sukūriai. Dėl šios priežasties karštos dujos kaupiasi viršutinėje šachtos dalyje ir ištekėjimui turi tik nedidelę angelę, per kurią nesugeba greitai pasišalinti, todėl vidutinė šachtos oro temperatūra yra didžiausia iš visų analizuotų modelių.

2. Mažiausiai tėkmės nestabilumą pastebėta šachtos modelyje, kai atidarytas viršus ir uždaryta apačia. Čia sukūriai taip pat formavosi viršutinėje šachtos dalyje, toje vietoje, kur karštos dujos per šachtos lubas išteka į aplinką. Šiuo atveju pastebėta, kad sukūrių dydis ir skaičius mažai tepriklauso nuo Re skaičiaus įtekėjime, todėl karštų dujų tėkmė gali lengvai pasišalinti iš modelio labai nepadidindama jo vidutinės oro temperatūros.

3. Šachtos modelis, kai atidaryta apačia ir uždarytas viršus, tiek tekėjimo nestabilumu, tiek temperatūros pasiskirstymu pasirodė esąs tarpinis tarp dviejų anksčiau minėtų modelių. Čia didžiausi tėkmės nestabilumai taip pat susidarė viršutinėje šachtos dalyje. Sukūrių skaičius, didinant Re skaičių įtekėjime, mažėdavo, tačiau jų dydis didėdavo. Sukūriai buvo mažesni nei tuo atveju, kai modelio viršus ir apačia uždaryti, nes įtekantis srautas pasiurbia vėsų aplinkos orą, kuris jį ataušina ir sumažina kilimo greitį, todėl šachtoje sukauptas energijos kiekis yra mažesnis nei esant pirmajam, tačiau didesnis, nei esant antrajam jos modeliui. Tai atitinka ir eksperimento rezultatus.

Gauta
2003 11 28

Pažymėjimai

T – temperatūra K
 u – tėkmės greitis m/s
 u_x, u_y, u_z – greičio komponentės m/s
 h – entalpija J/kg
 d_e – šachtos ekvivalentinis skersmuo m
 l – įtekėjimo angos ekvivalentinis skersmuo m
 α – šilumos atidavimo koeficientas $W/(m^2 \cdot K)$
 β – tūrinio plėtimosi koeficientas $1/K$
 μ – dinaminio klampumo koeficientas Pa · s
 ρ – tankis kg/m^3
 ν – kinematinio klampumo koeficientas m^2/s
 λ – šilumos laidumo koeficientas $W/(m \cdot K)$

Nedimensiniai parametrai

Gr_m – Grashofo kriterijus, $Gr_m = g \cdot \beta \cdot d_e^3 / \nu^2$
 Gr_o – Grashofo kriterijus, $Gr_o = g \cdot \beta \cdot l^3 / \nu^2$
 Pr – Prandtlio kriterijus, $Pr = \mu \cdot c_p / \lambda$

Re_m – Reinoldso kriterijus, $Re_m = u_m \cdot d_e / \nu$
 Re_o – Reinoldso kriterijus, $Re_o = u_o \cdot l / \nu$
 Ri_m – Ričardsono kriterijus, $Ri_m = Gr_m / Re_m^2$
 Ra – Relėjaus kriterijus, $Ra = Gr$ Pr

Indeksai

o – įtekėjimo angoje
 in – įtekėjime į šachtą
 f – apskaičiuotas pagal vidutinius masinius dydžius
 w – sienelės

Literatūra

1. Tamm G. O., Jaluria Y. Buoyancy and Pressure Induced Flow of Hot Gases in Vertical Shafts // Proceedings of the Twelfth International Heat Transfer Conference. Grenoble, France, 2002. P. 693–698.
2. Mercier G. P. Fire Induced Flow of Smoke and Hot Gases in Vertical Shafts // Department of Mechanical Engineering, Rutgers. The State of University of New Jersey, New Brunswick, NJ, 1996.
3. Zukoski E. E., Hunt M. L., Benedict N. L. Buoyant Flows in Vertical Shafts with Application to High-Rise Building fires // AIAAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. 1998. Vol. 2. P. 47–54.
4. FLUENT 6.0 User's Guide // Fluent Inc., 2001.
5. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Москва, 1990.

Arūnas Sirvydas, Povilas Poškas

MODELLING OF FIRE-INDUCED HOT GASE FLOWS IN HIGH VERTICAL SHAFTS

S u m m a r y

The buoyancy induced flow of hot gases in three high vertical shaft models (closed top and closed bottom, opened top and closed bottom, closed top and opened bottom) were studied numerically. For each model, the temperature and velocity fields were assessed for the constant Grashof number but the varying Reynolds number at the inlet.

The higher Reynolds numbers at the inlet have been found to increase the flow mixing and instability in the shaft. At the same time higher Reynolds numbers raise the average shaft air temperature.

Comparing all three models, it can be determined that the shaft model with closed bottom and top is the poorest, because hot gases have only a small route to escape, which maximizes hot gas concentration in the shaft; besides, there are more secondary flows (vortices, backflows) than in the other two configurations. In the model of opened top and closed bottom, hot gases can exit through the shaft roof and take out the greater part of energy (temperature). Also flow instabilities are very insignificant in this case and practically do not depend on the inlet Reynolds number. In terms of energy (temperature) conservation and flow instabilities, the shaft model with opened bottom and closed top appeared to be between the first and the second models – entrained ambient air through the shaft floor the cools inlet flow and slightly reduces the inlet flow temperature and velocity. The ave-

rage shaft air temperature in this case was higher than in the second, but lower than in the first model.

Key words: hot gases, high shaft, laminar flow, buoyancy and pressure influence, temperature and velocity fields

Арунас Сирвидас, Повилас Пошкас

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ПОТОКОВ ГАЗА, ВОЗНИКШИХ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА, В ВЫСОКИХ ШАХТАХ

Резюме

Течение потоков горячих газов под влиянием сил плавучести в высоких вертикальных шахтах было изучено численно. Исследованию подвергались три модели – закрытый верх и закрытое дно, открытый верх и закрытое дно, закрытый верх и открытое дно. Для каждой модели были определены термические свойства и поведение движения потока в шахте при постоянном числе Грасгофа, но при переменном числе Рейнольдса на входном отверстии модели.

Отмечено, что более высокие числа Рейнольдса во входном отверстии увеличивают перемешивание

и неустойчивость потока в шахте. Более высокие числа Рейнольдса также увеличивают среднюю температуру воздуха в шахте.

В результате сравнения трех моделей можно сделать вывод, что первая модель шахты является наихудшей, так как горячие газы имеют лишь маленькое отверстие для истечения, которое повышает концентрацию горячих газов в шахте. Кроме того, замечено больше вторичных потоков (вихрей, обратных течений), чем в остальных конфигурациях. Когда открыт верх и закрыто дно, горячие газы могут свободно истекать и вынести большую часть энергии (температуры), а вторичные течения здесь незначительны и практически мало зависят от числа Рейнольдса во входном отверстии. По температурным показателям и по неустойчивости потока третья модель оказалась между первой и второй – вовлеченный через пол шахты воздух охлаждает входные газы и незначительно снижает температуру и скорость входных газов. Средняя температура воздуха в шахте в этом случае была ниже температуры первой, но выше – второй модели.

Ключевые слова: горячие газы, высокая шахта, ламинарное течение, воздействие сил термогравитации и давления, температурные и скоростные поля