

Hidroterminio trimačio proceso Drūkčio ežere skaitinis modeliavimas

5. Dvifazis modelis

**Petras Vaitiekūnas,
Jelena Daimardanova,
Antanas Markevičius,
Vladislovas Katinas**

*Lietuvos energetikos institutas,
Atsinaujinančios energijos šaltinių
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas*

Dvifazis matematinis modelis skystis–dujos panaudotas skaitiniam trimačio pernešimo proceso modeliavimui. Nagrinėjama pernešimo proceso sąlygojančių veiksnių sąveika, jų įtaka masės ir šilumos mainams natūraliame baseine-aušintuve: vėjo greitis ir kryptis, kintantis vandens tankis, šilumos iš vandens atidavimas atmosferai, trinties ir šilumos maino koeficientai vandens ir oro skiriamajame paviršiuje.

Remiantis srovio ir vidinio temperatūrų profilių matavimų duomenimis surasta, kad vidutinio stiprumo nestabilus vėjas sukelia vandens paviršiuje maišymąsi, kurį galima įvertinti 1 m²/s dydžio turbulentių klampiu (skaičiavimuose naudotas turbulentinis klampis 0,9–1,3 m²/s). Vėjo impulso įtaka vandens paviršiu, eksperimento duomenimis, turi būti 1–3% vidutinio vėjo greičio. Modelis skirtas 1–5 m/s vidutinio vėjo greičiams. Palyginus eksperimento ir teoriniai rezultatai gerai sutapo. Siekiant, kad kiekybiniai rezultatai sutaptų, reikėtų turėti daugiau švairių veiksnių ribinių sąlygų, kintančio laike, bei spręsti nestacionarias pernešimo lygtis.

Raktažodžiai: hidrodinamika, skaičiuojamoji fluidų dinamika, skaitinis modeliavimas, trimačiai procesai, dvifaziai srautai, baseinas-aušintuvas, masės ir šilumos mainai

1. AVADAS

Šilumos ir masės mainai natūraliame aušinamajame baseine vyksta skiriamajame paviršiuje vanduo–oras, su šiluminiais procesais vandens masės viduje. Stebimi priešingi dviejų proceso sistemų ryšiai: paviršio temperatūros, kuri sąlygoja aušinimo intensyvumą, o tai su skirtingo tankio stratifikacijos sąlygomis turi įtakos baseino temperatūrų laukams, taip pat turbulentių pernešimų [1].

Matematinio modeliavimo bendrojo pernešimo proceso lygčių pagrindu sėkmė lemia teisinga uždavinio formuluoimą, besiremianti numatytais adekvaiomis tikrovei ribinėmis sąlygomis. Pagrindinės viso baseino pernešimo proceso dedamosios yra šilumos atidavimas atmosferai, turbulencijos charakteristikos, šilumos balansas, susidedantis iš šilumos nuostolių ir padidėjusio šilumos kiekio. Šilumos nuostolius lemia konvekcija, kondukcija, garavimas ir vandens spinduliuotė ilgų bangų spektre. Šilumos padaugėja dėl atnešamos iš Ignalinos atominės elektrinės (IAE) šilto vandens masės, saulės ir atmosferos spinduliuotės [1, 2].

Šio straipsnio tikslas – panaudojant skaičiuojamosios fluidų dinamikos kodus papildyti dvifazį matematinį modelį [3] vienfazio modelio [4, 5] šilumos balansą attrauktai elementais – saulės, atmosferos bei vandens spinduliuote, garavimo šiluma įvertinant trimatį pernešimo procesą struktūrai – pateikti skaičiavimo metodiką ir šilumos bei masės maino baseine-aušintuve skaičiavimo rezultatus.

2. PAGRINDINĖS LYGTYS IR SKAIČIAVIMO METODAS

Bendruoju atveju recirkuliaciniams srautams ir šilumos mainams aprašyti sprendžiama trimačio Navjė ir Stokso bei energijos lygčių sistema dviejų fazių teoriniam modeliui. Ją apibendrinta išraiška yra tokia [3]:

$$\operatorname{div}(r_i \rho_i \vec{V}_i \phi_i - r_i \Gamma_{\phi_i} \operatorname{grad} \phi_i) = r_i S_{\phi_i}; \quad (1)$$

čia r_i – i fazės tūrinė dalis, ρ_i – i fazės tankis kg/m³, ϕ_i – i fazės priklausomas kintamasis: $\phi = 1$ – tolydumo lygtis, U , V , W – impulsas x , y ir z koordinatėse kryptimis m/s, H – entalpijos, \vec{V}_i – i fazės greičio vektorius, \tilde{A}_ϕ – kintamojo ϕ difuzijos koeficientas, S_ϕ – kintamojo ϕ lygties srauto narys. (1) lygčių sistema sudaro Navjė ir Stokso bei energijos lygtis pirmai ir antrai fazėms, sprendžiamos baigtinių tūrių metodu [3, 4].

Vandens tankis yra temperatūros funkcija, o kitos savybės, kaip klampis, šilumos laidumas ir savi-toji šiluma, laikomos pastoviomis. Kintamas tankis lemia natūralios konvekcijos procesą.

PHOENICS programos koduose naudotas vandens tankis kaip temperatūros t funkcija [5]:

$$\rho = (999,83952 + 16,945176 t - 7,9870401 \cdot 10^{-3} t^2 - 46,170461 \cdot 10^{-6} t^3 + 105,56302 \cdot 10^{-9} t^4 - 280,54253 \cdot 10^{-12} t^6) / (1 + 16,879850 \cdot 10^{-3} t); \quad (2)$$

čia ρ – tankis kg/m^3 , t – vandens temperatūra $^{\circ}\text{C}$. Tankio gradientas vandens masėje su svorio jėgomis sąlygoja natūralią konvekciją, kuri gali būti svarbus fluido judėjimo veiksnys. Tačiau tai gali būti gera aproksimacija šiluminio tipo pernašos procesuose imti kitas fizines savybes pastoviomis, nes jų gradientas šiluminio fluido judėjimui yra visai mažas. Oro savybės modeliavimo procese laikomos pastoviomis esant $21,4^{\circ}\text{C}$ temperatūrai.

Vandens srautas yra modeliuojamas kaip laminarinis su didesniu turbulencija, o tai svarbu audinio baseino pernašos procesuose. Modeliavime naudota turbulencinio klampio hipotezė, kai molekulinis klampis pakeistas efektyviuoju klampiu, susidedančiu iš dviejų komponentų – molekulinio ir turbulencinio:

$$\Gamma_{\phi_i} = \nu_l / \text{Pr}_{\phi_i} + \nu_t (\text{Pr}_t)_{\phi_i}; \quad (3)$$

čia ν_l – laminarinis, ν_t – turbulencinis klampis m^2/s , Pr_{ϕ_i} – molekulinis ir $(\text{Pr}_t)_{\phi_i}$ – turbulencinis Prandtlio skaičiai. Oro srautui, esant vėjui apie 5 m/s , naudojame pastovų turbulencijos koeficientą 6,7, kaip ir [4] darbe.

Naudojant dekartinę koordinatę sistemą x kryptis orientuota į rytus, y – į dešinę ir z – vertikaliai į viršų. Koordinatė z dalijama į 18 dalių: 9 tenka vandens sričiai ir 9 – oro. Pastaroji prasideda vandens paviršiumi ir artimuoju reljefu, kurio nelygumai bei augmenija šiluminiai blokuoja elementus. Kraštinės sąlygos yra IAE naudojamo vandens debitas ir temperatūra. Oro sričiai – vėjo greitis (0–5 m/s) ir kryptis, drėgnumas, temperatūra, turbulencija, kurio paprasčiausia forma yra šiluminė:

$$\nu_t = 1,34 \times |U_{lok}|; \quad (4)$$

čia U_{lok} – vietinė vėjo greičio prie vandens paviršiaus reikšmė [3].

Tarpfaziniai parametrai. Juos sudaro tarpfaziniai difuziniai ir konvekciniai srautai. Pavyzdžiui, slėgio lygtis tarpfazinis masės srautas yra šios formos:

$$S_{P_i} = (f_{\phi_i} + \langle m_{j_i} \rangle) (\phi_i^{int} - \phi_i); \quad (5)$$

čia f_{ϕ_i} – tarpfazinis (difuzinis) pernešimo srautas kg/s ; m_{j_i} – masės pernešimo dydis tarp fazių kg/s ; $\langle \rangle$ – maksimumas tarp 0,0 ir m_{j_i} ; $\phi_i^{int} - \phi_i$ kintamojo reikšmė tarp fazių, $\phi_i - i$ fazės ϕ kintamojo reikšmė.

S_{P_i} dimensija yra $(\text{kg/s}) \times (\phi$ dimensija), t. y. jei ϕ yra greitis (m/s), tai S_{P_i} – niutonai ir jei ϕ – entalpija (J/kg), S_{P_i} – vatai (W). S_{P_i} atsiranda suporintose [7] kintamųjų lygtyse, ϕ_1 ir ϕ_2 , t. y.:

$$S_{P,1} = (f_{\phi,1} + \langle m_{2,1} \rangle) (\phi_1^{int} - \phi_1), \quad (6)$$

$$S_{P,2} = (f_{\phi,2} + \langle m_{1,2} \rangle) (\phi_2^{int} - \phi_2); \quad (7)$$

čia $m_{2,1} = -m_{1,2}$.

Tarpfazinė trintis. Ignoruojant tarpfazinį masės pernešimą tarpfaziniai srautai yra šie:

$$S_{v_i} = f_{v_i} \times (v_2 - v_1); \quad (8)$$

čia S_{v_i} turi dimensiją niutonais ir f_{v_i} dabar yra tarpfazinis trinties koeficientas Ns/m ar kg/s , v_2 – antros (oro) ir v_1 – pirmos (vandens) fazės greičiai m/s .

Tarpfazinis šilumos pernešimas. Daugeliu atvejų temperatūrų skirtumas yra varomoji jėga, kuria remiasi šilumos mainų koreliacijos.

Kai priklausomasis kintamasis yra entalpija, H_1 ir H_2 , ir ignoruojant masės pernešimą tarpfaziniai srautai yra šie:

$$\begin{aligned} S_{H,1} &= h_{12} \times A_S \times (T_1^{int} - T_1), \\ S_{H,2} &= h_{21} \times A_S \times (T_2^{int} - T_2); \end{aligned} \quad (9)$$

čia h_{12} – pirmos fazės tarpfazinis šilumos pernešimo koeficientas $\text{W/m}^2\text{K}$; h_{21} – antros fazės tarpfazinis šilumos pernešimo koeficientas $\text{W/m}^2\text{K}$; A_S – tarpfazinio paviršiaus plotas m^2 . Tarpfazinės temperatūros T_1^{int} ir T_2^{int} gali būti eliminuojamos bendruoju šilumos pernešimo koeficientu:

$$S_{H,i} = 1 \times A_S \times (T_2 - T_1) / (1/C_1 - 1/C_2); \quad (10)$$

čia $C_1 = h_{12}$ ir $C_2 = h_{21}$.

Tarpfazinis pernešimo koeficientas f_{P_i} yra gaunamas harmoniškai vidurkinant koeficientus C_1 ir C_2 :

$$f_{P_i} = 2 / (1/C_1 + 1/C_2). \quad (11)$$

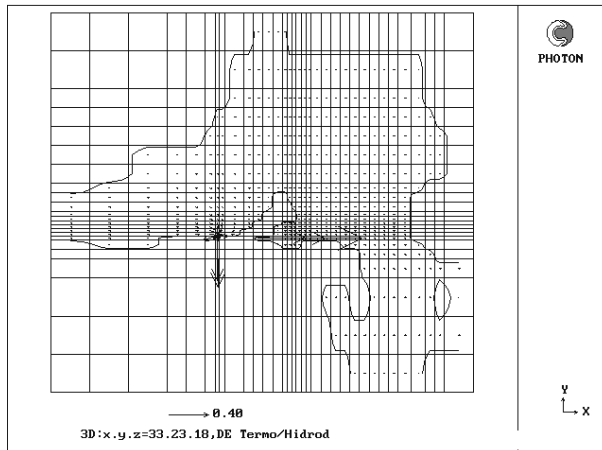
PHOENICS programoje dvifaziuose uždaviniuose skaičiuojant entalpijas srauto narys yra šios formos:

$$S_{H,i} = h_{12} \times A_S \times (T_2 - T_1); \quad (12)$$

čia h_{12} – šilumos pernešimo koeficientas $\text{W/m}^2\text{K}$; A_S – diskretinės celės paviršiaus plotas m^2 ir indeksai 1 ir 2 reiškia pirmą ir antrą fazes.

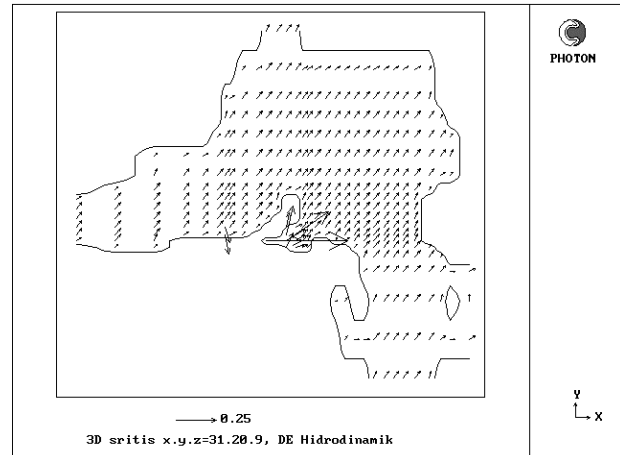
3. REZULTATAI IR ANALIZĖ

Tinklinė sritis sudaryta iš skirtingo dydžio celių (1 pav.). Stačiakampis xy plotas ($14,3 \times 5,3 = 75,79 \text{ km}^2$) apima aušinimo baseiną ir dalį sausumos. Pagal z vertikalę integravimo sritis apima 10 m vandens ir 100 m oro sluoksną virš baseino, atskaitant artimąjį sausumos reljefą (blokuojant diskretinius elementus).

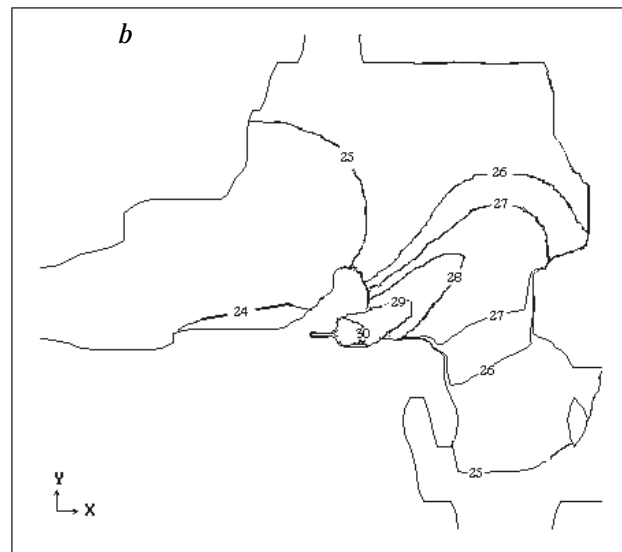
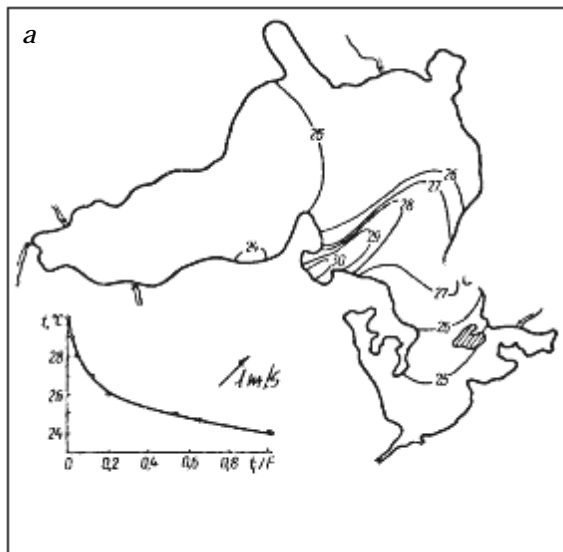


1 pav. Baseino srities diskretizavimas (vaizdas iš viršaus), vandens ištekėjimo iš IAE ir paėmimo į ją greičio vekto-

nors (1) tipo lygėse sistema yra suprastinta atmetant nestacionarumo narius (dalines išvestines pagal laiką). Laikas yra atrauktas iš išorinės iteracijos relaksacinius koeficientus ($FALSDT = 21600$ [7]). Skaičiavimo trukmė priklauso nuo to, per kurį laiką kompiuteris suskaičiuoja vieną išorinę iteraciją [7]. Testavimo rezultatai geriausiai sutapo esant tykai [3, 6]. 2 pav. matyti Drūkėse ežero vandens greičio vek-



2 pav. Drūkėse ežero vandens greičio vektorio lauko modeliavimo, puėiant pietvakarių vidutiniam (5 m/s) vėjui,



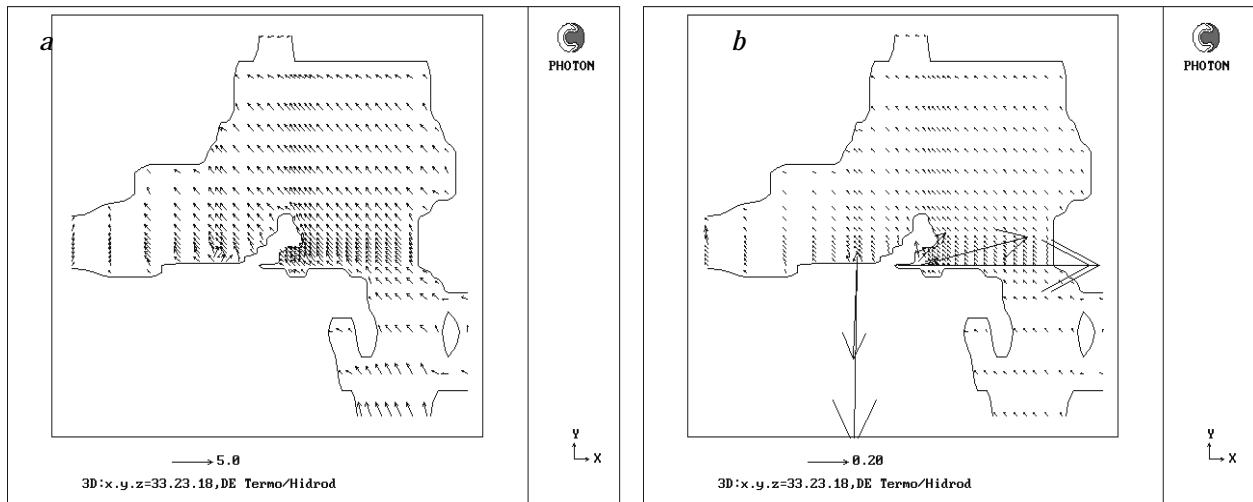
3 pav. Drūkėse ežero vandens paviršiaus izotermos (pietvakarių vėjas – 1 m/s), a – matuotos izotermos [2], b – modeliutos izotermos. Oro temperatūra $21,4^\circ\text{C}$, ištekančio iš IAE vandens temperatūra 30°C , vidutinė vandens paviršiaus temperatūra $24,2^\circ\text{C}$

Tokiu būdu ávertinama vėjo krypties, greičio ir reljefo átaka baseino hidrotermikai. Modeliavimo rezultatø testavimas atliktas pagal [2] darbo matavimø duomenis. Èia vandens tankis skaičiuotas atsiþvelgus á baseino vietinà temperatūrà pagal (2) priklausomybà; tarta, kad kitos vandens fizinės savybės pastovios.

Dvifazio fluído skaitinis modeliavimas $33 \times 23 \times 18$ srityje uþima daug kompiuterinio laiko,

torio lauko modeliavimo, puėiant pietvakarių vidutiniam (5 m/s.) vėjui, rezultatai, 3 pav. – vandens paviršiaus izotermø pasiskirstymo modeliavimo ir matavimo, puėiant 1 m/s pietvakarių vėjui, rezultatai. 4 pav. parodyti vandens paviršiaus ir oro 0,25 m virš vandens sumodeliuoti vektorio laukai, kai pietryčių vėjo greitis 1 m/s.

Modeliuojant vėjo efektus baseino vandens pavirþiui naudotas pastovus tarpfazinis trinties koefi-



4. pav. Fluido judėjimo modeliavimo, puėiant vidutiniam (1 m/s) vėjui, rezultatai: *a* – horizontalus vektorio laukas ore plokštumoje, nutolusioje nuo vandens paviršiaus 0,25 (vektorio mastelis – 5 m/s), *b* – vandens paviršiaus greiėio vektorio laukas (mastelis – 0,2 m/s)

cientas. Ėilto vandens maiđymasis su ėaltesniu baseine yra sudėtingas procesas, o vėjo efektai dar labiau komplikuoja jį sukeldami bangavimą ir skirtingus vandens lygius. Be to, vėjo kryptis dažniausiai yra nepastovi, kartu kinta ir terminė baseino padėtis.

4. ĮVADOS

1. Hidroterminiams trimaėiams dvifaziams procesams Drūkšio ežere skaiėiuoti panaudoti PHOENICS 3.5 kompiuteriniai kodai, ávertinantys vandens tankio kintimo priklausomybė nuo temperatūros, ėilumos ir masės mainų vandenyje, ėilumos mainus su atmosfera bei vėjo greiėio ir krypties átakà.

2. Palyginus skaitinius rezultatus su matavimo duomenimis, matyti, kad ėilumos mainai gerai sutapo puėiant vidutiniam (1 m/s) vėjui. Siekiant tiksliau apraðyti procesà, reikėtò spràsti nestacionarias pernađos lygtis su laike kintamomis krađtinėmis sąlygomis.

Gauta 2004 11 12

Literatūra

1. Dripius M. R. Tvenkinio auđintuvø hidroterminis reþimas. Vilnius: Mokslas, 1985. 169 p. (rusø kalba).
2. Ignalinos atominės elektrinės ėaldomojo tvenkinio ekosistemos bŭklė pradiniu jos eksploatacijos periodu // Ėiluminė energetika ir aplinka. Vilnius: Lietuvos MA, 1992. T. 10. D. 1. 246 p.
3. Vaitiekūnas P., Petkeviėienė J., Katinas V. A Numerical Simulation of Three-Dimensional Hydrothermal Processes in a Cooling Pond // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its Applications. 1998. Vol. 11. N 3. P. 348–354.
4. Montenegro H. S., Choucino M. A. Thermal dissipation in natural Basin // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its Applications. 1994. Vol. 7. N 3. P. 14–36.

5. Vaitiekūnas P., Petkeviėienė J., Katinas V. Hidroterminio trimaėio proceso Drūkšio ežere skaitinis modeliavimas. 1. Skaiėiavimo metodika // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 42–52.
6. Vaitiekūnas P., Markeviėius A. Two-phase numerical model of heat transfer in a natural basin // Ninth International PHOENICS Users Conference, 23–27 September, 2002. Moscow. CD-Rom, Disk, <http://www.cham.co.uk>. 2002. 20 p.
7. PHOENICS 3.5 VR. 2002. <http://www.cham.co.uk>

Petras Vaitiekūnas, Jelena Ėaimardanova, Antanas Markeviėius, Vladislovas Katinas

NUMERICAL SIMULATION OF HYDROTHERMAL PROCESSES IN LAKE DRŪKŠIAI

5. THE TWO-PHASE MODEL

Summary

The state of two-phase ‘liquid–gas’ flow has been modeled numerically by the three-dimensional method of a complex research of heat and mass transfer. This allows examining the interaction of some transfer processes in a natural cooling basin (Lake Drūkšiai): the power and direction of the wind, the variable density of the water, the heat conduction and heat transfer coefficients of the water–air interface. The combined effect of these natural actions determines the heat amount that the basin is able to dissipate to the surrounding atmospheric medium in thermal equilibrium (no change in the mean water temperature).

This article presents a number of most widely used expressions for vertical and horizontal heat transfer coefficients. Basing on the stream velocity and mean temperature profiles measured in the cooling pond, as well as on their time variations, suggestions are made that the mixing rate at the water surface is caused by the natural space–time variation of the wind and can be described by the value of the eddy viscosity coefficient – 1 m²/s (in numerical modeling 0.9–1.3 m²/s were used). The wind influence on the surface of the lake, according to the experimental data, is 1–

3% of the mean wind velocity. The model is applied for a moderate wind, approximately 1–5 m/s of the mean wind velocity.

A comparison of the experimental and numerical results showed a qualitative agreement. For a better quantitative approximation it is necessary to have more boundary conditions variable with time and to solve the unsteady set equations for transfer processes.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD), numerical simulation, three-dimensional processes, two-phase flows, hydrodynamics, lake as a cooler, mass and heat exchange

Петрас Вайтекунас, Елена Шаймарданова, Антанас Маркявичюс, Владисловас Катинас

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ТРЕХМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОЗЕРЕ ДРУКШЯЙ

5. ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ

Резюме

Двухфазная математическая модель „жидкость-газ“ была использована для численного моделирования трехмерных процессов переноса массы и тепла. Исследуются

взаимосвязь факторов, влияющих на процессы переноса массы и теплообмен в натуральном бассейне-охладителе, скорость и направление ветра, переменная вязкость воды, теплообмен с атмосферой, коэффициенты трения и теплообмена на поверхности раздела фаз.

А пòаòüà ëñì í ëüçì áàì ù ø èðì ëì í ðèì áí ýàì ùà áüðàæáì ëý äëý áàððèëàëüì í áì è áì ðëçì í òàëüì í áì ëì ýóòèèèèáì òí à òàì ëì í áì áì à. Í à íñì í áà èçì áðáì è è ðì òèèáé òñðááì áì í í é ñëì ðì ñòè è òàì í áðàòóðçì í àéááì í, +òì ñðááì áé ñèèçì í áñòàáéëüì ù é áàðáð ì ðì èçáì àèò ì áðáì áøèááì èá áì áì í é í í áàððì í ñòè, ëì òì ðì à ì í æì í í òáì èòü òòðáóéáì òì í é áýçèì ñòüþ (1 ì²/ñ) (í ðè ì í áàéèðì ááì è è ñì í ëüçì ááì 0,9-1,3 ì²/ñ). Áëëýì èá èì í óéüñà áàòðà í à áì áýì óþ í í áàððì í ñòü, ñì áéáñì í ýèñì áðèì áì òàëüì ùì ááì í ùì, ñì ñòàáéýàò 1-3% ñðááì áé çèì ðì ñòè áàòðà. Í áà ì í áàéè ì ðááì áçì à-áì ù äëý òì áðáì í í áì áàòðà (ñðááì ýý ñëì ðì ñòü 1-5 ì/ñ).

Ñðááì áì èá òàì ðàðè-áñèèè è ýèñì áðèì áì òàëüì ùò ðàçóëüòàòì á ì í èáçàëì èá-áñòàáì í í á èò ñì áì áááì èá. Áëý áì èáá òì +ì í áì ëì èè-áñòàáì í í áì ñì áì áááì ëý í áì áðì àèì í èì áòü áì ëüø á áðáì è-í ùò òñèì áéé, èçì áì ýþùèòñý áì áðáì áì è, è ðøàòü í áñòàóèì í áðì ùà òðááì ëì ëý ì áðáì í ñà.

Èëþ-ááüà ñëì áà: áéáðì áèì àì èèá, áç-èñèèèèèè áý áèì àì èèá æèáèì ñòáé, +èñèáì í í à ì í áàéèðì ááì èá, òðáòì áðì ùà ì ðì óáññç, áàóòóáçì ù é ì í òì è, íçáðì - ì òèáàèèòàëü, ì áññì - è òàì ëì í áì áì