
Hidroterminių trimačių procesų Drūkšių ežere skaitinis modeliavimas

4. Šilumos mainai

**Jelena Petkevičienė,
Petras Vaitiekūnas,
Antanas Markevičius**

*Lietuvos energetikos institutas,
Atsinaujinančių energijos
šaltinių laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Ignalinos atominės elektrinės (IAE) baseinas-aušintuvas kaip natūrinis modelis imtas šilumos ir masės pernešimų skaitiniam modeliavimui panaudojant PHOENICS kompiuterinius kodus. Gautas pernešimo procesų Drūkšių ežere trimatis skaitinis sprendinys.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra skaitiniu būdu analizuoti Drūkšių ežero – IAE aušintuvo gebą aušinti nustatant ribas, kad būtų išvengta vandens perkaitinimo. Elektrinė pastatyta prie pat ežero. Žinotinas aušintuvo šiluminės disipacijos pajėgumas esant numatytoms atmosferos sąlygoms. Aušintuvo pajėgumo kriterijai – baseino vanduo kaip aušinantis fluidas, išleidžiamo šilto ir imamo aušinti vandens temperatūros.

Baseinui turi įtakos keli gamtos veiksniai: tiesioginė ir difuzinė saulės spinduliuotė, garavimo šiluma, priverstinė oro konvekcija, radiaciniai šilumos mainai, natūrali konvekcija vandenyje ir kt. Visų gamtos veiksnių įtaka sąlygoja baseino šilumos kiekį, kurį jis pajėgia disipuoti į supančią atmosferą palaikydamas terminę pusiausvyrą (bendra vandens temperatūra nesikeičia). Kitas narys, įtraukiamas į šilumos balansą, yra iš IAE atnešamas šilumos kiekis. Šiluminio balanso gavimo kriterijai yra šie: iš IAE atnešamo šilto vandens kiekis, aušintuvo vandens masė ir jų temperatūros. Šie pagrindiniai veiksniai panaudoti skaitiškai modeliuojant trimatį uždavinį.

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

1. ĮVADAS

Ignalinos AE šiluminis poveikis ežerui-aušintuvui yra akivaizdi ir konkreti antropogeninio poveikio forma. Iš elektrinės išleidžiamas pašildytas vanduo į ežerą iš esmės keičia nusistovėjusį hidroterminį režimą. Toks šiluminis poveikis, kai vandens temperatūra aukštesnė už kritinę – 28°C, pasidaro ypač destruktivus ežero biofaunai. Nors pastaraisiais metais sumažėjo IAE darbo intensyvumas, tačiau išliko ežero dalies pašildymo per 28°C grėsmė [1]. Todėl ežero-aušintuvo hidroterminių procesų skaitinio matematinio modeliavimo uždaviniai yra aktualūs ir jiems pastaraisiais metais skiriama vis daugiau dėmesio [2–7].

Tobulinant ir sudarant skaitinio modeliavimo metodus pernešimo procesams vandens telkiniuose modeliuoti reikia įvertinti tokius veiksnius, kaip vėjo, tankio (Archimedo) jėgų ir morfometrinių aušintuvo duomenų įtaką hidroterminiam režimui. Sprendžiant praktinius uždavinius svarbu žinoti ne tik vidutinę temperatūrą, bet ir jos pasiskirstymą paviršiuje ir į gilu-

mą. Vandens masių judėjimas dėl tankio skirtumų ypač pasireiškia jo tolimesnėse zonose [8].

Tvenkinio-aušintuvo hidrotermiką apibrėžia masės ir šilumos mainai vandens paviršiuje, atmosferos ir šilumos pernešimo procesai pačioje tvenkinio vandens masėje. Egzistuoja atvirkštinis šių procesų ryšys, nes vandens paviršiaus temperatūra nusako aušinimo intensyvumą, kuris turi įtakos vandens telkinio temperatūros laukui, stratifikacijos sąlygoms, srauto tankio pokyčiams ir turbulentiniam pernešimui [8].

Vėjo įtakai įvertinti gali praversti darbas [2], kuriame naudojant ADREA-I ir PHOENICS kodus sprendžiama dvimatės atmosferos mezoskalės cirkuliacijos problema. Darbo, duodančio bendrus Navje–Stokso lygčių sprendinius, privalumai yra tai, kad tokio pobūdžio modelius galima pritaikyti uždaviniuose su kitomis kraštinėmis sąlygomis.

Vertinant vietinės topografijos ypatumus, galima naudoti su paviršiumi susietas koordinatas. Darbe [3] šitaip tirtas teršalų pernešimo procesas Švedijos

mieste Sundsvall'e. Panaudota K tipo turbulentinio klampio išraiška įvertinant vietinį Ričardsono skaičių ir vėją.

Vėlesnių darbų [4] modeliavimo uždaviniuose stengiamasi įvertinti kuo daugiau veiksnių, turinčių įtakos baseinų-aušintuvų hidrotermikai: srities geometriją, dinamines ir šilumines savybes, ribines sąlygas, mainus vanduo-oras paviršiu riboje, natūralią bei priverstinę konvekciją, garavimo bei kondensacijos šilumą, saulės spinduliuotę per metus skaidant ją mėnesiais, paromis ir net valandomis.

Darbe [5] gruntinių vandenų pernešimo procesams, pirmiausia turbulentiniam degimo procesui skaitiškai modeliuoti panaudotas vadinamasis daugiasrautis turbulencijos modelis (Multi Fluid Model – MFM). Šiame darbe panaudota vadinamoji srauto plitimo koncepcija (Fluid Population Concept). Pateikti modeliavimo rezultatai bei daroma išvada, kad ši koncepcija yra adekvati ir gali būti naudojama gruntiniams vandenims modeliuoti.

Greta informacijos apie oro ar vandens fizines savybes, gamtiniams tekėjimams būdinga daugelis savybių: ypatingos kraštinės sąlygos oro ir vandens skiriamose ribose, pasireiškiančios vandens paviršiaus trintimi, turbulentinės kinetinės energijos srautais į vandens masę.

Darbo tikslas – ežero-aušintuvo šilumos mainų modeliavimas įvertinant konvekciją, difuziją ir šilumos atidavimą nuo ežero paviršiaus į atmosferą skaitiškai sprendžiant trimates pernešimo procesų diferencialines lygtis panaudojant PHOENICS programą [9].

Darbą finansavo Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas (LVMSF).

2. SKAITINIO MODELIO SUDĖTIS

Ežero pernešimo procesų modeliavimo ypatumai. Hidroterminę ežero būklę nusako greičių ir temperatūrų laukai. Nepaisant didelių kompiuterinės technikos laimėjimų, mažų greičių (1–10 cm/s eilės), vyraujančių ežere dėl krantų ir dugno geometrijos, augmenijos pačiame ežere, skaitinis modeliavimas yra labai sudėtingas ir šiuo metu galimas tik apytikslis, įvertinant vien svarbiausius, turinčius didžiausią įtaką pernešimams, veiksnius [1]. Sprendžiant trimates Navje–Stokso ir energijos lygtis, negalima tiksliai apibrėžti kraštinių sąlygų (krantų, dugno). Be to, dugno ir pakraščiu augmenijos vegetacijos laikotarpiu pastebimai keičiasi ežere gausios povandeninės augmenijos aukštis ir tankis, kartu ir pratekamumo sąlygos. Krantų geometriją dar galima priimtinu tikslumu aproksimuoti lauzte, tuo tarpu skaitinis sprendimas į gilumą apribojamas tam tikru vandens sluoksnio storium, pvz. 10 m, kaip tai daryta darbe [4]. Tačiau artimojoje zonoje reikia tiksliau apibrėžti

gylį, nes nuo to labai priklauso pernešimai tolimesnėse zonose ir artimosios zonos horizontalių sluoksnių struktūra [7].

Cirkuliacinis AE aušinimo vandens srautas teka uždaru ciklu. Cirkuliacinis srautas AE aušinimo sistemoje tarp paėmimo ir išleidimo taškų yra apibrėžtas (temperatūros, greičiai, debitas), ežero ribose šis srautas dėl nuolat kintančių meteorologinių sąlygų nevienareikšmiai pasklinda po visą ežero akvatoriją. Tokių procesų išmatavimas ir modeliavimas kelia nemažai problemų, nors būtent šis cirkuliacinis srautas yra pagrindinis AE į ežerą išskiriamos šiluminės energijos nešėjas bei skleidėjas [8].

Mažai pratakais Drūkšių ežero konkrečioje krantų ir dugno konfiguracijoje srovių cirkuliaciją formuoja du veiksniai: vėjų paviršinės įtampos ir cirkuliacinio AE aušinimo vandens srauto tarp išleidimo ir paėmimo taškų papildoma greičio dedamoji.

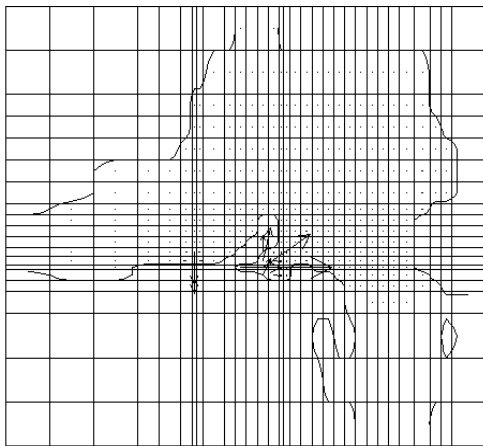
Būtina atlikti natūralaus aušinamojo baseino, kaip adekvataus šilumos iš atominės elektrinės priėmėjo, analizę, susidedančią iš geografinių, atmosferinių vandens šilumos charakteristikų. Kintant atmosferos ir sausumos sąlygoms keičiasi ir baseino-aušintuvo hidroterminės charakteristikos. Kiekvienas atmosferos ar sausumos veiksnys negali apibrėžti aušintuvo šilumos mainų ypatumų. Visi veiksniai yra susieti tarpusavyje ir juos reikia nagrinėti kartu, įvertinti jų visumą. Galutinis tikslas yra įvertinti visus šiuos veiksnius baseino šilumos balanse. Ši analizė mums bus pagrindas nustatant baseino aušinimo pajėgumą ir suskaičiuojant bendrą vandens temperatūros padidėjimą. Yra veiksnių (garavimas, saulės ir atmosferos spinduliuotė), kurie gali būti visai nežymūs bendrame ežero šilumos balanse, todėl jų čia nenagrinėsime.

Ežeras beveik 100% aušinamas per šilumos atidavimą nuo ežero paviršiaus į atmosferą [10, 11]. Todėl elementarus paviršiaus plotelis su jo paviršine temperatūra ir sąlygoja lokalinį šilumos atidavimą į atmosferą.

Uždavinio geometrijos aprašymas. Darbe pateiksime šilumos ir masės mainų natūraliame baseine priklausomybę nuo kelių sąlygų. Baseino ilgis yra 14,3 km, plotis – 5,3 km, didžiausias gylis – 35 m, perimetras – 60,5 km, ežero baseinas – 61,5 km². Visai arti prie ežero pastatyta Ignalinos atominė elektrinė. Šilto vandens ištekėjimo ir šalto vandens paėmimo vietas skiria pusiasalis, kuris natūraliai sąlygoja didesnius temperatūrų skirtumus tarp šių taškų, ypač vasarą.

Pernešimo lygčių sistemai diskretizuoti įvairiais būdais reikia sudaryti tinklinę sritį [6, 10, 11]. Naudojant dekartines koordinatas skirtuminis tinklelis yra $x \cdot y \cdot z = 31 \cdot 20 \cdot 9$. Skirtuminis tinklelis yra kintamo žingsnio pagal koordinatų ašis (1 pav.).

Pagrindinės lygtys. Matematinės srauto pernešimo procesų lygtys, aprašančios dinaminis ir šilumi-



3D sritis x.y.z=31.20.9, DE Hidrodinamik

1 pav. Skirtuminis tinklelis ($x \cdot y \cdot z = 31 \cdot 20 \cdot 9$). Drūkšių ežero kontūras su paviršinio vandens greičio vektoriais prie vandens išleidimo ir ėmimo kanalų. Greičio vektorių mastelis 0,25 m/s

nius srauto procesus, yra šios bendriausios formos (Navje–Stokso ir energijos) lygtys [9–12]:

$$\underbrace{\text{div}(\rho \vec{v} \phi)}_{\text{konvekcija}} - \underbrace{\text{div}(\Gamma_\phi \cdot \text{grad} \phi)}_{\text{difuzija}} = \underbrace{S_\phi}_{\text{šaltinis}}; \quad (1)$$

čia ϕ – apibendrintas kintamasis, kuris lygčių sistemoje įgyja reikšmes: 1 – nepertraukiamumo lygtyje, U, V, W – greičio vektoriaus dedamosios koordinatinių kryptimis Navje–Stokso lygtyse; H – entalpija energijos lygtyje.

Pradinės ir kraštinės sąlygos. Pateiktai lygčių sistemai reikia pradinių duomenų: cirkuliacinio aušinimo vandens debitas G (m³/s) (tas pats paėmimui), iš kurio apskaičiuojamas įtekančio (ištekančio) vandens greitis, AE cirkuliacinio aušinimo vandens pradinė temperatūra T_p (°C), vidutinė oro temperatūra T_o (°C), vidutinis vėjo greitis ir kryptis.

Nagrinėjant šilumos mainus tarp dugno, krantų ir vandens kaip adiabatinius, vien vandens paviršius darys terminę disipaciją su atmosfera. Judėjimo lygtims kraštinės sąlygos – nulinės greičio komponentių reikšmės.

Šiluminės ir dinaminės vandens savybės. Vandens savybės (tankis, savitoji šiluma, šiluminis laidumas ir klampis) yra temperatūros funkcijos. Dėl skirtingų tankių atsiranda gravitacijos jėgos ir formuojasi natūrali konvekcija, kuri sukelia srauto judėjimą. Tankio priklausomybei nuo temperatūros aprašyti pasinaudosi me eksperimentine [4] priklausomybe.

$$\rho = (999,83952 + 16,945176t - 7,9870401 \times 10^{-3}t^2 - 46,170461 \times 10^{-6}t^3 + 105,56302 \times 10^{-9}t^4 - 280,54253 \times 10^{-12}t^5) / (1 + 16,879850 \times 10^{-3}t). \quad (2)$$



Likusios fizinės savybės (klampis, šiluminis laidumas, savitoji šiluma) šiame skaičiavimo etape yra pastovios, nes jų priklausomybė nuo temperatūros mažesnė ir jų gradientų įtaka srauto judėjimui nedidelė.

Priverstiniai konveciniai mainai. Oro srautai virš baseino paviršiaus sukelia šilumos mainus priverstinės konvekcijos būdu. Šilumos mainų dydis, sąlygojamas šio veiksnio, bus toks:

$$q = h(T_w - T_f); \quad (3)$$

čia q išreiškia konvecinį šilumos srautą W/m², kuris yra proporcingas vandens ir oro temperatūrų skirtumui; T_w – vandens paviršiaus temperatūra; T_f – oro temperatūra. Proporcingumo konstanta h reiškia visus veiksnius, kurie turi įtakos konveciniams mainams, t. y. paviršiaus sąlygoms, kurios apibūdina priklausomai nuo paviršiaus sąlyčio geometrijos (bangavimas), judančio oro srauto charakteristikų, termodinaminių ir pernešimo savybių (oro greitis, stiprumas, turbulencijos). Priverstinė konvekcija, gaunama dėl oro judėjimo prie vandens paviršiaus, gali būti išreikšta koeficientu h :

$$h = St \cdot \rho_f \cdot V_{rel} \cdot C_p; \quad (4)$$

čia ρ_f – oro tankis, V_{rel} – santykinis greitis tarp vandens ir oro, C_p – savitoji oro šiluma, St – Stantonio skaičius. Reliatyvaus greičio įtaka vandens paviršiumi nustatyta eksperimentiniu būdu ir sudaro 1–3% vidutinio vėjo greičio.

Stantonio skaičius skirtas konveciniam šilumos pernešimui. Vandens ir oro fazių ramybės būklėje jis yra lygus apytiksliai 0,003. Dabar galima išreikšti priverstinės konvekcijos šilumos mainus:

$$q = St \cdot \rho_f \cdot C_p \cdot V_{rel} \cdot (T_w - T_f). \quad (5)$$

Imant V_{rel} ~1,0 (m/s), ρ_f ~1,2 (kg/m³), C_p ~1005. (J / kg · K), Stantonio skaičius St lygus ~0,0033. Įrašius šias skaitines reikšmes, gaunama šilumos mainų (šilumos atidavimo) lygtis, $1 \leq h \leq 3,62 V_{rel}$:

$$q = 3,62 (T_w - T_f). \quad (6)$$

Nesant vėjo, šilumos atidavimas į atmosferą aprašomas paprasta šilumos atidavimo lygtimi

$$q = \alpha(T_w - T_f); \quad (6a)$$

čia α – šilumos atidavimo koeficientas (nuo vandens paviršiaus į atmosferą, $\alpha \approx 1,0$).

Tokios lygtys, kaip (6), yra įtrauktos į (1) sistemos energijos lygties šilumos srauto narį, kai kintamasis T_w – lokali vandens temperatūra T_{w,i} o kiti

nariai gauti atitinkamai iš supančios atmosferos sąlygų.

Momento pasikeitimas tarp oro ir vandens paviršių. Paviršiniai srauto momentai egzistuos kaip oro srautų poveikio vandens paviršiui pasekmė. Šis momento šaltinis yra išreikštas tiesine forma ir charakterizuojamas savo intensyvumu ir kryptimi. Oro srautų efektas vandens paviršiui kinetiniu požiūriu bus įvertintas kaip paviršiaus sąlyčio srauto momentas, proporcingas vėjo stiprumui. Skaičiavimo programoje šis efektas bus išreikštas kaip momentas dviejų srautų, kurių sudėtinis veiksmas atspindės vėjo poveikį vandens paviršiui. Kiekvienas iš šių srautų išreikš įtaką apibrėžta kryptimi; vienas srautas išreikš šiaurės–pietų kryptį, o kitas – rytų–vakarų:

$$\begin{aligned} S_u &= C(V - u), \\ S_v &= C(V - v); \end{aligned} \quad (7)$$

čia u – vėjo momentas vakarų–rytų kryptimi; v – vėjo momentas pietų–šiaurės kryptimi; C ir V – vidutinio vėjo, veikiančio vandens paviršių, vektoriai.

Nagrinėjant temperatūros ir greičio nedidelių kitimų prielaidas vertikalios koordinatės kryptimi, kur kas mažesnius negu horizontalių koordinatė kryptimis vykstančius procesus galima nagrinėti kaip visą trimatį modelį ir įvertinti neizotropinį turbulentiškumą arba visai jį ignoruoti srauto dinamikoje.

3. SKAITINIAI REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Pagal numatytas įtekėjimo–ištekėjimo sąlygas sprendžiama trimačių pernešimo lygčių sistema visame ežero tūryje. Metodikos skyriuje aprašytu būdu pagal vietinę vandens temperatūrą apskaičiuojamas jo

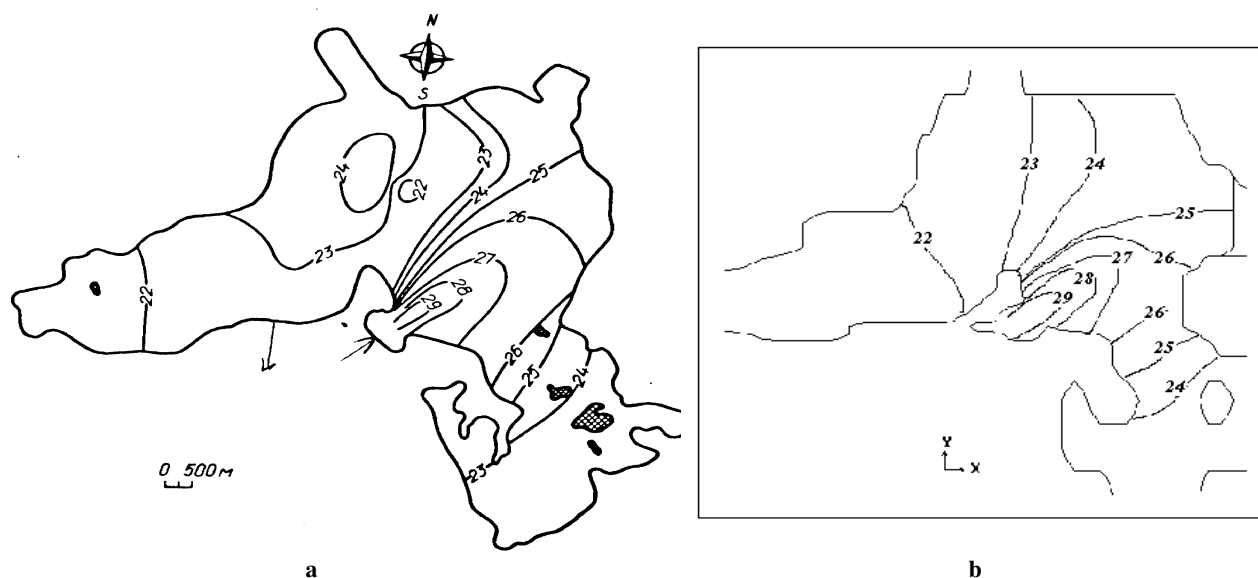
vietinis tankis ir modelyje įvertinamos gravitacijos jėgos, sužadinančios natūralią konvekciją ir pasiskirstančios atitinkamuose vandens lygiuose. Čia judesio kiekio pernešimas susietas su šilumos pernešimu, taigi pernešimo lygčių sistema yra jungtinė. Vandens masių judėjimo greičiai yra labiau pastebimi įtekėjimo į ežerą ir ištekėjimo iš ežero zonose, tačiau parenkant atitinkamus greičio vektorių mastelius galima gauti vandens judėjimo vaizdą ir kitose vietose.

Šiuo metu šilumos mainai ežere modeliuojami įvertinant vėją, kaip tai atlikta darbuose [4, 6]. Naudojamosi PHOENICS programa detalės, įskaitant ir Q1 failą, yra pateiktos darbe [4]. Hidrodinaminių procesų modeliavimo uždavinys aprašytas darbe [12].

Konvekciniai šilumos mainai sprendžiami taip: trimatės Navje–Stokso ir energijos lygtys su kintamu klampiu sprendžiamos skaitiniu baigtinių tūrių iteraciniu metodu. Skaitinio sprendimo metu pagal vietinę ežero temperatūrą ir (2) priklausomybę surandamas vietinis vandens tankis. Gautas vandens tankio reikšmių laukas toliau įvertinamas Navje–Stokso lygtyse gaunant mišrios konvekcijos sprendinius. Kadangi priverstine konvekcija gauti greičiai nedideli, tai šiame uždavinyje yra svarbu įvertinti kintamą vandens tankį kaip temperatūros funkciją.

Šilumos mainų modeliavimas iš pat pradžių buvo susietas su hidrodinaminiu procesu. Esant jungtinei lygčių sistemai padidėja iteracijų skaičius. Rezultatai palyginami tik pagal ežero-aušintuvo izotermų pasiskirstymus.

Šilumos pernešimas difuzija čia vaidina svarbų vaidmenį, nes priverstinė konvekcija labai maža, ypač nesant vėjo ir tolimesnėse srityse nuo karšto vandens įtekėjimo, ir elektrinės reikmės imamo vandens vietų. Tuomet šiluma ežere pernešama išimti-



2 pav. Drūkšių ežero paviršiaus izotermos nesant vėjo: a – matuotos (1986 07 23) [8], b – apskaičiuotos. Oro temperatūra 23,6°C

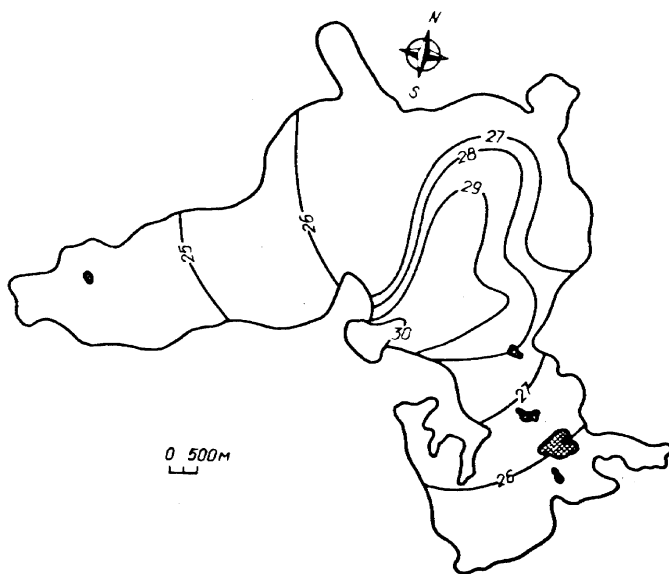
nai molekulinė ir moline difuzija, taip pat natūralia konvekcija.

Skaičiavimai parodė, tai patvirtina ir teorija, kad šilumos mainų dalis į atmosferą vasarą visai nedidelė, nes vandens ir oro temperatūrų skirtumas yra nedidelis.

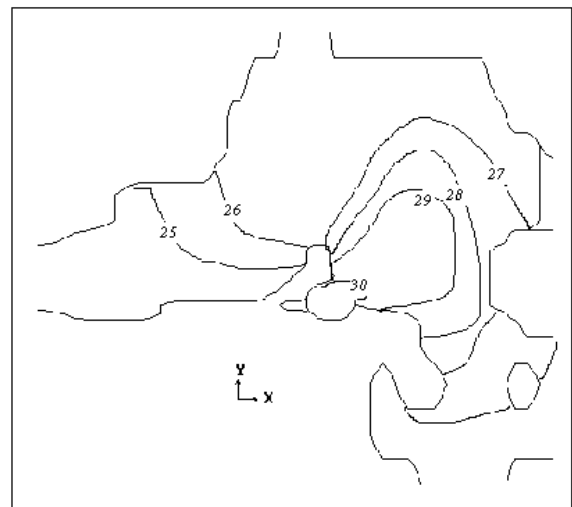
V_{rel} kiekybinės reikšmės svarba yra didesnė arimojoje aušinimo intensyvumo zonoje, nes ežero pakraščiuose jo įtaka šilumos mainams yra gerokai mažesnė stabdant vėją krantų augmenijai. Uždaviniui labai supaprastinti galima sudaryti supaprastintą V_{rel} apskaičiavimo visame ežero paviršiuje būdą, kai $V_{rel} = const$.

Vėjo įtakos ežero šilumos mainams pirminiai skaitiniai rezultatai buvo gauti darbe [6], kuriame pateikta ir supaprastinta skaičiavimų metodika, neįskaitant reljefo įtakos oro srautams virš ežero.

Gauti pirminiai šilumos mainų ežere nesant vėjo rezultatai (2 pav.). Vėjo įtaka naudojant Dekarto koordinates įvertinta esant vidutiniam, 1 m/s, vėjui (3 ir 4 pav.). Šilumos mainams ežere modeliuoti iki šiol vėjo įtaka nesusieta su esamu reljefu. Ateityje tai bus atlikta, sujungiant pernešimo procesus atmosferoje ir vandenyje į vieną uždavinį kaip dvifazį vanduo-oras (skystis-dujos) procesą.

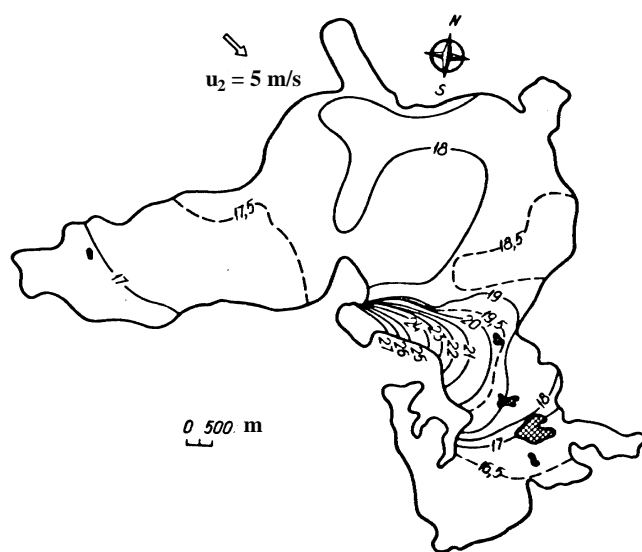


a

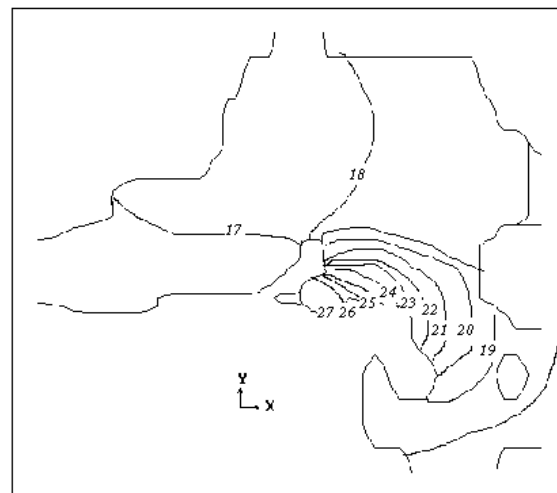


b

3 pav. Temperatūrų pasiskirstymas Drūkšių ežero paviršiuje esant pietryčių vidutiniam, 1 m/s, vėjui: a – matuotos (1988 07 01) [8], b – apskaičiuotos izotermos. Oro temperatūra 23,9°C



a



b

4 pav. Temperatūrų pasiskirstymas Drūkšių ežero paviršiuje esant šiaurės-vakarų vidutiniam, 1 m/s, vėjui: a – matuotos (1985 09 10) [8], b – apskaičiuotos izotermos. Oro temperatūra 9,4°C

4. IŠVADOS

1. Remiantis matavimų duomenimis ir panaudojus PHOENICS 1.4EP CFD kodus, atliktas Drūkšių ežero-aušintuvo šilumos mainų modeliavimas. Skaitiškai baigtinių tūrių metodu sprendžiant stacionarią trimatę Navje–Stokso ir energijos lygčių sistemą, nustatius pradinės ir kraštinės sąlygas, empirinę slėgio priklausomybės nuo temperatūros funkciją, gautas ežero tūrinis temperatūrų laukas.

2. Skaitiniame modelyje įvertinta mišri konvekcija ir difuzija vandens masėje, šilumos atidavimas į atmosferą ir vėjo įtaka ($V_{rel} = \text{const}$, nedideliems vėjo greičiams, nuo 0 iki 5 m/s) ežero paviršiui ir šilumos mainams. Pašildytas vanduo nuo 3 m storio sluoksnio artimojoje zonoje sklinda periferijos link ir jam kylant į paviršių dėl tankio skirtumų tas sluoksnis plonėja.

3. Šilumos mainų Drūkšių ežere skaitinio modeliavimo rezultatų analizė ir palyginimas su matavimo duomenimis parodė jų priklausomybę nuo šiluminio laidumo vanduo–oras, vandens kintamo tankio, natūralios konvekcijos. Teoriniams rezultatams patikslinti būtina nuodugniau įvertinti kraštinės sąlygas atliekant natūrinius matavimus kartu su skaitiniu modeliavimu.

Gauta
2002 03 16

Literatūra

- Eidukevičius P. Ignalinos atominės elektrinės šiluminės taršos Drūkšių ežere modeliavimas // Energetika. 1999. Nr. 2. P. 26–33.
- Naslund E., Karlsson E. and Thaning L. Sea breeze simulation with a static profile of the eddy viscosity // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications. 1991. Vol. 4. Suppl. II. P. 196–211.
- Naslund E., Svensson U. and Karlsson E. Boundary-layer over Sundsvall. The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications. 1993. Vol. 6. No. 3. P. 222–238.
- Montenegro H. S., Choucino M. A. Thermal dissipation in natural Basin // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications. 1994. Vol. 7. No. 3. P. 14–36.
- Svensson U. The fluid population concept in ground water modeling // The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications. 1996. Vol. 9. No. 3. P. 378–386.
- Katinas V. Gamtinių ir atmosferinių veiksnių įtakos hidroterminiams procesams Drūkšių ežere skaitinis modeliavimas. Mokslinio darbo ataskaita. Kaunas: LVMSF. LEI, 1999. 116 p.
- Vaitiekūnas P., Petkevičienė J., Katinas V. Hidroterminių trimačių procesų Drūkšių ežere skaitinis modeliavimas. 1. Skaičiavimo metodika // Energetika. 2000. Nr. 4. P. 42–52.
- Ignalinos atominės elektrinės šaldomojo tvenkinio ekosistemos būklė pradinio jos eksploatacijos periodu // Šiluminė energetika ir aplinka. Vilnius, 1992. T. 10. D. 1. 246 p.
- Spalding D. B. Shareware PHOENICS 1.4 EP. CHAM Ltd. London, 1995. 137 p.
- Vaitiekūnas P., Petkevičienė J., Katinas V. Telkinio-aušintuvo hidroterminių trimačių procesų skaitinis modeliavimas // Energetika. 1998. Nr. 2. P. 83–87.
- Vaitiekūnas P., Petkevičienė J. & Katinas V. A Numerical Simulation of Three-Dimensional Hydrothermal Processes in a Cooling Pond // The PHOENICS Journal Computational Fluid Dynamics & its applications. 1998. Vol. 11. No. 3. P. 348–354.
- Baltrėnas P., Vaitiekūnas P., Petkevičienė J. Hidrodinaminių procesų Drūkšių ežere skaitinis modeliavimas // Aplinkos inžinerija. 2001. T. X. Nr. 1. P. 117–123.

Jelena Petkevičienė, Petras Vaitiekūnas,
Antanas Markevičius

NUMERICAL SIMULATION OF HYDROTHERMAL PROCESSES IN LAKE DRŪKŠIAI 4. HEAT TRANSFER

S u m m a r y

The cooling pond of the Ignalina Nuclear Power Plant was used as a natural full-scale model for numerical simulation of heat and mass transfer processes using PHOENICS codes. The three-dimensional numerical solution was found for transfer processes in Lake Drūkšiai.

The main objective of the present work is to analyze the feasibility of using the water of a definite basin as the cooling fluid for a nuclear power plant determining the limits in its operation in order to avoid the increase of the basin water level. The station is located on the bank of the basin and requires to know the thermal dissipation capacity of the mass of water subjected to the atmospheric conditions and station cooling consequences. The criterion to evaluate the feasibility of using the basin water as the cooling fluid will be both its mean temperature variation and the local temperature at the station water intake.

The basin is exposed to several environmental conditions: solar incidence (direct and diffuse), vaporization cooling, air-forced convection, radiative exchange, natural convection, etc. The combined effect of these natural factors determine 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). The other term to be included in the thermal balance will be the heat of the water discharged by the station. Finally, the location of the water discharged by the station must be considered. The criterion to establish the optimum location of the water temperature at the intake are in the range of cooling water temperatures determined by the station design. All these effects are included in the computational procedure for three-dimensional transfer processes.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD), numerical simulation, three-dimensional processes, hydrodynamics, lake as cooler

**Елена Петкявичене, Пятрас Вайтекунас,
Антанас Маркявичюс**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ ТРЕХМЕРНЫХ
ПРОЦЕССОВ НА ОЗЕРЕ ДРУКШЯЙ
4. ПЕРЕНОС ТЕПЛА**

Резюме

Бассейн-охладитель Игналинской атомной электростанции (ИАЭС) использован как модель натурального бассейна для численного моделирования массо- и теплообмена с использованием программы ФЕНИКС. Получено трехмерное численное решение процессов переноса в озере Друкшяй.

Цель настоящей работы – выполнить анализ по теплообмену, установить пределы охлаждения во избежание перегрева водной массы бассейна. Электростанция расположена на берегу озера; необходимо знать возможности термической диссипации охладителя при данных атмосферных условиях. В ка-

честве определяющих критериев использованы водная масса бассейна, дебит и температура используемой ИАЭС воды.

Бассейн подвергается воздействию нескольких природных факторов: прямой и дисперсионной солнечной радиации, теплоты испарения, ветра, теплообмена излучением, натуральной конвекции в воде и др. Влияние всех этих факторов определяет количество тепла в бассейне, которое он в состоянии диссипировать в атмосферу, поддерживая термический баланс (общая температура воды не меняется). В тепловой баланс включены также дебит и температура воды, поступающей из ИАЭС. Включенные в тепловой баланс критерии: дебит подогретой воды из ИАЭС, масса воды бассейна-охладителя и их температуры – это основные факторы, включенные в численное моделирование трехмерной задачи.

Ключевые слова: гидродинамика, вычислительная динамика жидкостей, численное моделирование, трехмерные процессы, бассейн-охладитель, массо- и теплообмен