

УДК 536.2.02

OPEN FOAM ПАКЕТИНИН КАРАЖАТТАРЫ МЕНЕН КӨЧКҮЛҮҮ АГЫМДАРДЫН ТҮШҮҮСҮНҮҮЧ ӨЛЧӨМДҮ МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Мамаев Самарбек Сатыбалдыевич, аспирант, E-mail: smamaev@oshsu.kg

Акназарова Сүйүмкан Сагыналиевна, аспирант, E-mail: saknazarova@list.ru

Марс кызы Таттыбубу, аспирант, E-mail: tatu_1995@list.ru

Ош мамлекеттик университети
Ош, 723500, Кыргыз Республикасы

Аннотация: Бул макалада Open FOAM пакетинин жардамында көчкүлүү агымдын түшүүсүнүн моделин түзүү маселеси карлаган, анда көчкү эки фазалуу тубуленттик агым катары моделдештирилген (кар-аба). Бөлүмдүн үстүнкү катмары менен эки фазалуу чөйрөлөрдүн кыймылынын маселелерин-көлөмдүк үлүштү которуштуруу методу болгон, сандык метод негиз кылып алынган.

Ачкыч сөздөр: Көчкүнү башкаруу, турбуленттик агым, эки фазалуу чөйрө, суюктук.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХОДА ЛАВИННЫХ ПОТОКОВ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА OPEN FOAM

Аннотация: В этой статье обсуждается проблема создания модели лавинного потока с помощью пакета Open FOAM, в котором лавина моделируется как двухфазный трубчатый поток (снег-воздух). Задачи движения двухфазных сред с верхним слоем разреза основывались на численном методе, который являлся методом объемного переноса.

Ключевые слова: управление лавиной, турбулентное течение, двухфазная среда, жидкость.

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF AVALANCHE FLOWS VEHICLES WITH OPEN FOAM PACKAGE

Abstract: This article discusses the problem of creating an avalanche flow model using the Open FOAM package, in which an avalanche is modeled as a two-phase tubular flow (snow-air). The problems of the motion of two-phase media with the upper layer of the section were based on the numerical method, which was the volume transfer method.

Key words: control of an avalanche, turbulent flow, two-phase medium, liquid.

1. Киришүү

Эңкейиштердеги агымдар, анын ичинде көчкүлөр тоолордогу кенири таралган кубулуш. Кыргызстанда мындай көчкүлүү агымдар бийик тоолу аймактарда кездешет б.а. эңкейиштердин түшүү бурчтары 15° тан көп болгон бардык жерлерде кезигет жана кар катмарынын тереңдиги 30-40 см жана андан жогору болгон жерлерде кездешет. Кар булутунун айынан чакырылган үлкөн бузуулар, адамдын курман болууларын жана зыян тартуулар (чыгымдар), тоолуу жолдорго жыл бою кыймылды үзгүлтүксүз колдоого мүмкүнчүлүктүн жоктугу, көчкүлөр менен күрөшүү проблемасына көп көңүл бурууну, аларды изилдөөнү жана моделдештирүүнү талап кылат.

2. Кыймылдагы чөйрөнүн модели

Көчкү кысылбоочу турбуленттик эки фазалуу агым катары кар жана аба түрүндө көрсөтүлгөн. Рейнольдс боюнча борборлоштурулган теңдемелер пайдаланылат. Модель Рейнольдстун теңдемелерин камтуучу теңдемелер системасы менен сүрөттөлүп көрсөтүлөт, алар: ажырабастык теңдемеси, фазанын көлөмдүү үлүшүнүн теңдемеси, турбуленттик пульсациялоолордун кинетикалык энергиясы үчүн теңдемелер жана реологиялык катыштар.

Рейнольдсту н теңдемели төмөндөгүдөй болуп көрүнөт: (тамганын үстүндөгү сызык Рейнольдс боюнча борборлоштурууну билдирет):

$$\frac{\partial(\overline{p}u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\partial u_i u_j} + \overline{p u_i u_j}) = \rho g_i - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_i}$$

мында $\overline{\tau_{ij}}$ -илешкек чыңалуулардын тензорунун Рейнольдс боюнча борборлоштурулган компоненти болот:

$$\overline{\tau_{ij}} = 2\mu \overline{e_{ij}}, \quad \mu = \mu(|\overline{\gamma}|), \quad \overline{e_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad |\overline{\gamma}| = \sqrt{2I_2(\overline{e})}, \quad I_2(\overline{e}) = e_{ij} e_{ij}$$

мындан ары μ кинематикалык илешкек аркылуу билдирилет: $\mu = \rho \nu$, a ρ жана ν a карынын көлөмдүү үлүшү аркылуу туюндурулат.

$$\nu = (1-a)\nu_{air} + a\nu_{snow}, \quad \rho = (1-a)\rho_{air} + a\rho_{snow}, \quad a = \begin{cases} 1 - \text{кар} \\ 0 < a < 1 - \text{катмар} \\ 0 - \text{аба} \end{cases}$$

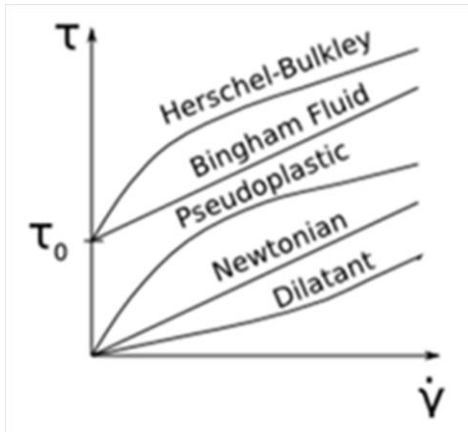
мында “air” индекси абага ылайык келет, а “snow” индекси карга туура келет.

Ар түрдүү фазалар үчүн түрдүү реологиялык катыштар (айкалыштар) пайдаланылган, кар үчүн (Eglit M.E., Yakubenko A.E.2014), Хершель-Балклинин реологиялык катыштары алынды, аба Ньютондук чөйрө катары көрсөтүлгөн.

Ньютондук модель Хершель-Балклинин модели

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad \mu = \text{const} \qquad \tau = \mu \dot{\gamma}, \quad \mu = \frac{\tau_0 + k|\dot{\gamma}|^n}{|\dot{\gamma}|}, \quad k, n = \text{const}$$

Жөнөкөй жылышуучу агым учуру болуп калса ылайыктуу реологиялык катыштар төмөндөгүдөй көрүнүшкө ээ болушат (1-сүрөт).



1-сүрөт. Чөйрөлөрдүн ар түрдүү моделдери үчүн жөнөкөй жылышма.

агымда жылышуунун тездигинен жылышуучу чыңалуунун көз карандыгы

Тандалып алынган реологиялык маанилерге байланыштуу кинематикалык илешкектик кар үчүн да аба үчүн да ар түрдүүчө эсептелип чыгарылат.

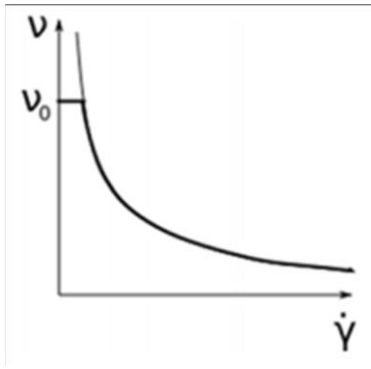
$$\nu_{air} = \text{const} = 1,48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{сек},$$

$$\nu_{snow} = \min \left(\nu_{snow_0}, \frac{\tau_0 + k|\dot{\gamma}|^n}{\rho_{snow}|\dot{\gamma}|} \right),$$

мында $\nu_{snow_0} = \text{const}$ болот жана изилденүүчү көчкүнүн берилген-дери менен ылайыктуулукта моделдин колибровкасында

берилет [3]. ν_{snow_0} турактуусун киргизүү зарылчылыгы кардын кинематикалык илешкектигинин мааниси $\tau_0 = 0$ болгондо, чексиздикке умтулат, качан $|\dot{\gamma}| \rightarrow 0$ болгондо 2-

сүрөттө көрсөтүлгөндөй болот. Болжолдуу эсептерде абанын тыгыздыгы берилген $\rho_{air} = 1 \text{ кг} / \text{м}^3$. $\rho_{snow}, k, n, \tau_0$, -дой болгон, кар үчүн параметрлер, натурдук берилгендер менен шайкештиктеги калибрдик модельдерге тандалып алынат. Фазалардын тездиктери бирдей болуп эсептелинет (Eglit M.E., Yakubenko A.E. 2014).



2-сүрөт. Эффективдүү илешкектиктин Хершел-Балклинин $n < 1$ болгондогу чөйрөсү үчүн жылышуунун чөйрөсүнөн. көз карандылыгы.

Моделди сүрөттө үчүн төмөндөгүдөй теңдемелер пайдаланылды.

Ажырабастыктын теңдемеси:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0$$

Фазанын көлөмдүү үлүшүнүн теңдемеси:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \frac{\partial(a \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0,$$

Турбуленттуктун модели катары К- ϵ модели алынат. К турбуленттик кинетикалык энергия үчүн теңдеме:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) + P_K - \rho \epsilon.$$

Энин диссипациясы үчүн теңдеме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \epsilon)}{\partial x_j} &= C_{\epsilon 1} P_K \frac{\epsilon}{K} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \\ - \overline{\rho u_i u_j} &= 2\mu_t \bar{e}_{ij} - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} K, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}, \quad P_K = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \end{aligned}$$

жогоруда келтирилген турбуленттуулуктун модели төмөндөгүдөй берилүүчү беш турактууларды өзүндө кармап турат.

$$C_\mu = 0,09; \quad C_{\epsilon 1} = 1,44; \quad C_{\epsilon 2} = 1,92; \quad \sigma_K = 1,0; \quad \sigma_\epsilon = 1,3.$$

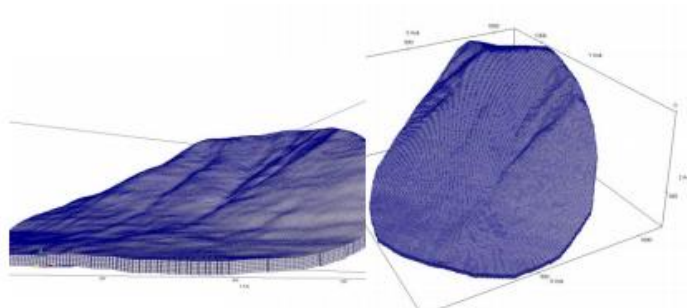
Программалык камсыздоо.

Көчкү агымынын модели Open FOAM пакетинин жардамында түзүлгөн. Бөлүмдүн чек арасы менен же эркин болгон үстүнкү катмар менен бөлүнүшкөн эки чөйрөнүн эсеп кысабы үчүн дайындалган InterFoam чечүүчүсү пайдаланат, анда интерфейс чек ара катары каралбайт. Эсеп эркин абалдагы үстүнкү бетти камтуучу фиксацияланган сеткада (тордо) болуп өтөт. Эркин болгон үстүнкү беттин формасы үстүнкү бетке жакын турган ар бир уячанын негизделишинин үлүшүн эсепке алуу менен аныкталат. Суюк фаза менен ээленген уячанын үлүшү үчүн транспорттук теңдемесин чыгаруу менен бирге кылууга мүмкүн болот: Мындай метод “Суюктуктун көлөмү” деп аталат же VOF схемасы деп аталат.

Эсептик торчо.

Эсеп 5 м. көлөмдөгү сызыктуу параллелепипеддер формасындагы уячалардан турган сеткада ишке ашырылат, алар төмөндөгүдөн турат:

- 206630 чектиттерден;
- 5232887 грандардан;
- 447345 ички грандардан;
- 163372 уячалардан.



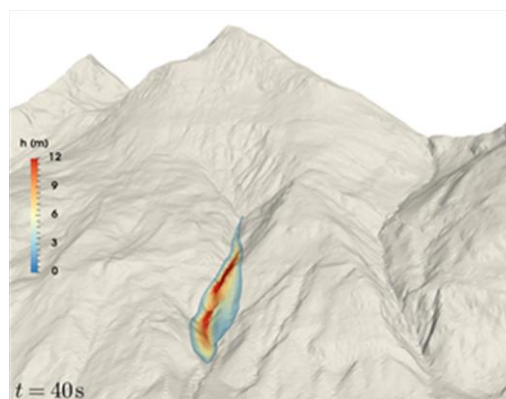
3-сүрөт. Эсеп тармагынын (областынын) сеткалуу сызыктары.

Баштапкы жана чектик (чек аралык) берилгендери

Маселеде төмөнкү чек аралык шарттар берилген:

Эсептик областтын төмөнкү чек арасында жабышкактыктын шарты белгиленген. Эсептик областтын жогорку жана каптал чек аралары ачып өтүү шарты менен чек аралардын стандарттык аймактары катары берилген, аларда атмосфералык басым кыймыл-аракетте болот.

4-сүрөттө көчкүнүн пайда болуу аймагында жатуучу кардын катмары жашыл түс менен белгиленген, $t=0$ болгондо 1,5 метрден ашпайт. Математикалык жактан бул мындайча түшүндүрүлөт, а маркердик функциясы, кар бар жердеги эсептик сетканын уячаларында I ге барабар болот, жана калган учурларда 0-гө барабар болот ($a=0(x,y,z)$). Ошондой эле $t=0$: $\varepsilon=0$, $K=0$, $\mu_t=0$ до да.4-сүрөттө изилденүүчү көчкүнүн



4-сүрөт. Убакыттын баштапкы моментиндеги көчкүнүн агымы.

катмарланууларынын реалдуу зонасы боз түз менен белгиленип көрсөтүлгөн. Көчкүнүн жаралуу зонасы жана көчкү

катмарынын зонасы карап чыгуучу процесстин баштапкы жана аякы этаптарына шайкештикте ылайыктуу болот (Эглит М.Э., Якубенко А.Е. 2016)..

Эсептөөлөр

Аяккы көлөмдөрдүн методдору менен жекече туундулардагы баштапкы теңдемелерди дискретизациялоонун натыйжасында сызыктуу алгебралык теңдемелердин системасы алынды, алар итерациялык методдор менен чечилет. Дискретизацияланган теңдемелерди чечүү үчүн a фазасынын көлөмдүү үлүшү үчүн, K турбуленттук кинетикалык энергиянын ε диссипациясынын жана кыймылдын теңдемесине Гаусс-Зайделдин методдорунун жардамы менен текшилөөчү чечкич пайдаланылат. Үзгүлтүксүздүн теңдемесинин жардамы менен алынган, басымга карата болгон теңдеме алдын ала шартталуусу менен градиенттердин байланышуу методу аркылуу чечилет (Лойцянский Л.Г. 2003).

Эсептер РАНдын НИИСИнин жогорку өндүрүмдүү эсептик серверинде чыгарылат, алар төмөндөгүлөрдөн турат.

- 2 x Xeon E5-2670v1 (Sandy Bridge) 8 cores 2*6 CHz (16 threads)
- 4xchannel DDR3 memory controller
- MEM 256 GB DDR3-1333 ECC
- OS Ubuntu 15/10 64-bit/

Натыйжалар

Эсептеп чыгуулар процессинде $u_i(x,y,z,t)$ $i=1,2,3$. $a(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$ лардын маанилери алынды, ошондой эле $a=0,1$ шартынын ичинде аныкталган көчкү агымынын чек арасы алынды.

Төмөндөгү диапазондогу кар үчүн P_{snow} , V_{snow} , τ_0 , k , n параметрлеринин маанилер менен эсептер чыгарылган:

$$p[\text{кг/м}^3] \quad v_0[\text{м}^2/\text{с}] \quad \tau_{0/p}[\text{м}^2/\text{с}^2] \quad \frac{k}{\rho}[\text{м}^2/\text{с}] \quad n$$

200	100	1	10^{-5}	2
300	10^5	0.1	10^{-4}	0.5
	10^{-2}	10	10^{-6}	

Машиналык убакыттын 36 саатын ээлеген 108 учур эсептелип чыгарылган. Агымдын динамикасына τ_0 жана v_0 параметрлери таасир этет деген жыйынтыктар жасалган, жана ылайыктуу тандоодо агым жантайынкы жерде секиндей баштайт. Бул берилген калибрдик эсептерде агымдын ылдамдыктары орточо эсептер менен 60м/с болуп чыккан, ал деген берилген көчкү үчүн болгон. Ылдамдыктын чоңдугуна К илешкектиктин параметри олуттуу таасир эткендеги табылган болчу жана мурдагы эсептерден алынган, катылган ылайыктуу, калган параметрлер менен к параметрлери боюнча кошумча изилдөө жүргүзүлгөн.

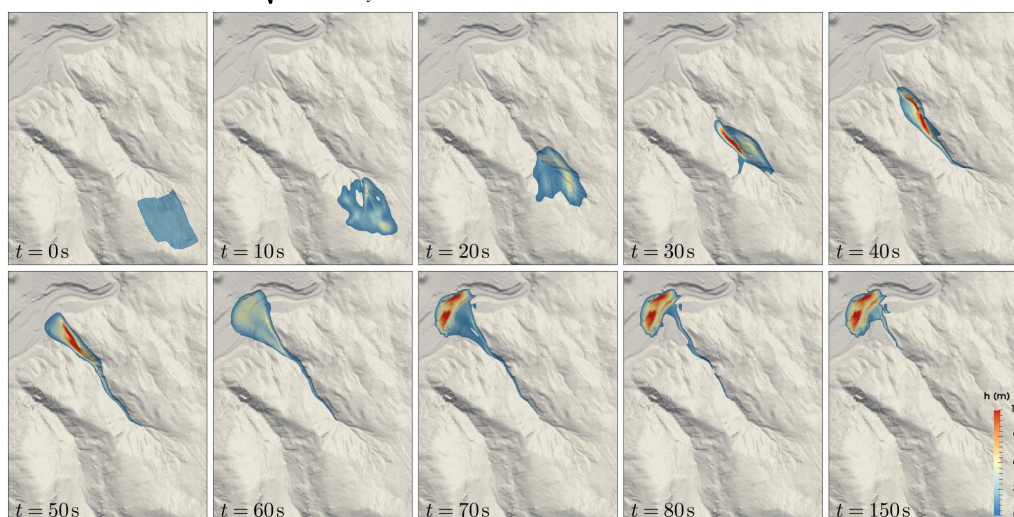
$$\frac{k}{p} = 2,3,4,5,6,7,8,9,10,50,100 \text{ м}^2 / \text{с}, \tau_0 / p = 10 \text{ м}^2 / \text{с}^2,$$

$v_0 = 10^5 \text{ м}^2 / \text{с}, p = 200 \text{ кг} / \text{м}^3, n = 0.5$ менен варианттар эсептелип чыгарылган.

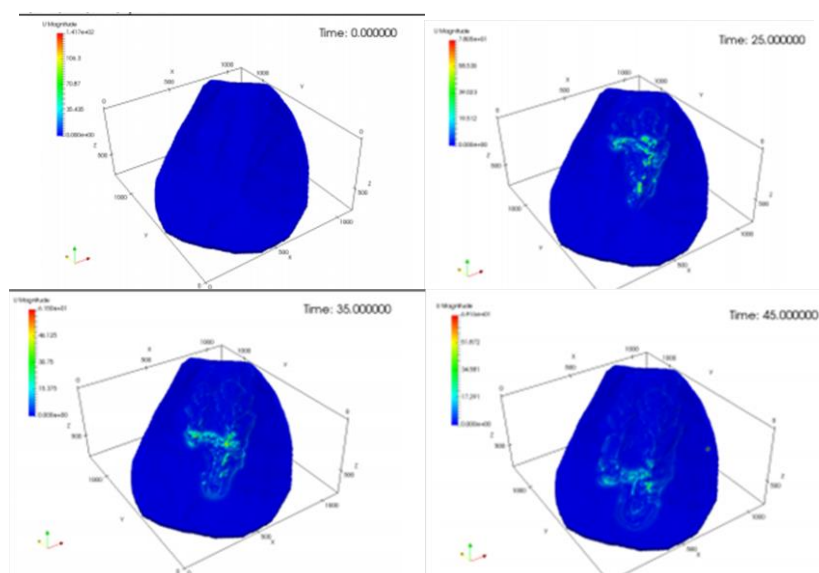
$\frac{k}{p} = 5 \text{ м}^2 / \text{с}$ параметри менен болгон эсеп натурдук берилгендерди көбүн эсе так сүрөттөп

түшүндүргөн. 5-сүрөттөрдө көчкү агымынын чек аралары жана убакыттын түрдүү моменттеринде агымдын үстүнө багытталган тездиктин чоңдуктарына бөлүштүрүү көрсөтүлгөн. 6-сүрөттө убакыттын ошол эле моменттеринде эсептик тармактын жогорку чек арасында тездиктиктин чоңдугун бөлүштүрүү көрсөтүлгөн. Ал кардын –чаңдуу булуттун тартылуусун чагылдырат. x, y октору-горизанталдуу z-огу вертикалдуу U түстүү

легендасында $\text{Magnitude} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$ (Eglit M.E., Yakubenko A.E. 2014).



5-сүрөт. Кар көчкүнүн ылдамдыгы



6-сүрөт. Кардын чаңдуу булутунун көрүнүшү

Берилген эсепте агымдын толугу менен токтоосунан кийин, эсептөөлөр процессинде алынган көчкү катмарларынын формасы көчкү катмарынын натурдук формасына жакындаганын көрүүгө болот. Агымдын орточо ылдамдыгы 44,8м/с түзөт., демек бул очокто көчкүлөрдүн кыймылынын чыныгы тездигине жакындашат. Көчкү агымынын максималдуу тездиги (кардын-чоңдугу булутун кошкондо) 78 м/с. түзөт (Joel H. Ferziger 2002).

Корутунду

OpenFOAM пакетинин жардамында көчкү агымынын модели түзүлгөн, ал тездиктин, басымдын, кардын көлөмдүү үлүшүнүн компоненттеринин маанисин эсептик тармактын ар бир чекинде, убакыттын түрдүү моменттеринде алууга мүмкүндүк берет. Алынган маалыматтар боюнча көчкү катмарларынын зонасы, көчкү түшкөндөн кийин тикеден-тике катталган жакынкы жерлердин чек аралык зоналары түзүлгөн. Убакыттын бардык моменттерине басымдын жана кардын көлөмдүү үлүшүнө, тегиздиктердин бөлүнүшү эсептелип чыгарылган, айрыкча көчкү агымынын максималдуу тегиздиги. Берилген натыйжалар көчкү коркунучу бар зонаны аныктоого мүмкүндүк берет жана коргонуу курулуштарын оптималдуу проектирлөөгө жардам берет. Андан ары маселени көбүн эсе толук сеткада эсептөө пландаштырылууда, ошондой эле бул моделди башка пакетте салыштыруу үчүн түзүү да пландаштырылууда, мисалы INMOST же жеке коддун жардамы менен.

Адабияттар:

1. Eglit M.E., Yakubenko A.E. (2014). Numerical modeling of slope flows entraining bottom material. Cold Regions Science and Technology 108, 139–148.
2. <http://www.openfoam.org>. OpenFOAM 7.0. User Guide (2020).
3. Joel H. Ferziger, Milovan Perit. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics - 3., rev. ed. - Paris; Tokyo: Springer.
4. Лойцянский Л.Г (2003). Механика жидкости газа. М.: Дрофа,-840с.
5. Патанкар С.В., (1984). Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. Англ.-М.:Энергоатомиздат.-152с.
6. Эглит М.Э., Якубенко А.Е. (2016). Влияние захвата донного материала и неньютоновской реологии на динамику турбулентных склоновых потоков. Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. №3, стр. 3-15. DOI: 10.7868/S056852811603004X

