ISSN 1694-6065

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ, АВТОМАТИКИ И ГЕОМЕХАНИКИ НАН КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КОМИТЕТ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ КЫРГЫЗСТАНА

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ, ГЕОМЕХАНИКИ, ГЕОТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
№ 64(2), 2026 г

БИШКЕК-2026

Журнал издается с января 2001 года

Выходит 4 раза в год

Учредители:
Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР и ОО “Комитет по теоретической и прикладной механики Кыргызстана”

Адрес редакции:
Кыргызская Республика,
г. Бишкек,
ул. Скрябина 23

тел:
+996 312 541 115,
+996 312 541 113,
+996 312 562 785,
+996 555 62 40 68
факс:
+996 312 541117

Журнал зарегистрирован в Министерстве юстиции КР
Свидетельство
№ 2179 от10.10.2024

ISSN 1694-6065
Подписано в печать 29.06.2026 г.

Тираж 200 экз.
Заказ
Отпечатано в типографии КГТУ им. И. Раззакова

Рецензируемое научно-периодическое издание

Редакционная коллегия:

Главный редактор
Кожогулов К.Ч., академик НАН КР, д.т.н., профессор, k.kozhogulov@mail.ru

Ответственный секретарь:
Орозобекова А.К.,к.ф.-м.н.,с.н.с., oakk43@gmail.com

Члены редколлегии
Ахметов Б.С.- д.т.н., профессор (РК);
Бримкулов У.Н-чл.-корр. НАН КР, д.т.н, профессор (КР);
Воробьев А.Е.-д.т.н., профессор (Россия).
Тлебаев М.Б. – д.т.н., профессор (РК)
Бийбосунов Б.И.- д.ф.-м.н., профессор (КР);
Рычков Б.А.- д.ф.-м.н., профессор (КР);
Чормонов М. Б.- д.ф.-м.н., профессор (КР);
Ершина А.К., -д.ф.-м.н., профессор (РК)
Бийбосунов А.И.- д.ф.-м.н. (КР);
Кабаева Г.Д. - д.ф.-м.н., профессор (КР);
Никольская О.В. - д.т.н. (КР);
Рыбин А.К.- д.ф.-м.н. (КР);
Абдиев А.Р-д.т.н.
Тажибаев К.Т. - д.т.н., профессор (КР);
Курбаналиев А.Ы.-д.ф.-м.н. (КР)
Сулайманова С. М.- д.ф.-м.н., профессор

Материалы напечатаны с оригиналов авторов. Журнал индексируется в библиографической базе РИНЦ.

УДК 531
ББК 22.25
© Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР и Комитет по теоретической и прикладной механике Кыргызстана, 2026

УДК 517. 977.5. 928.2

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Исаков К.И., Осмонов К.Т., Алтыбаев А.Ш., Керимбаева С.А., Мурадилов Р.М.
КГТУ им. И. Раззакова

В статье рассматриваются режимы работ разрабатываемого проекта создания бульдозера-погрузчика, с телескопически изменяемыми рабочими органами с фронтальным угловым изменяемым ковшом. Были предложены математические модели, написанные в полярной системе координат, учитывающие переносные, относительные и абсолютные движения центров масс рабочих органов. Они дают удобную систему квазилинейных многомерных уравнений вторых порядков, в обобщенных координатах и обобщенных скоростях. Для одного из двух важных этапов движения был использован численный метод Эйлера. Составлен и реализован общий алгоритм и программа решения задачи. Полученные результаты показывают на сходимость решений.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, бульдозер-погрузчик, система квазилинейных уравнений, математические модели описания, метод Эйлера, обобщенные величины, дифференциальные уравнения, алгоритмы.

КВАЗИСЫЗЫКТУУ ДИФФРЕНЦИАЛДЫК ТЕҢДЕМЕЛЕР СИСТЕМАСЫН КОЛДОНУУ МЕНЕН МЕХАНИКАНЫН МАСЕЛЕЛЕРИН ЧЕЧҮҮДӨГҮ КОМПЬЮТЕРДИК ИШТЕТҮҮЛӨР

Исаков К.И., Осмонов К.Т., Алтыбаев А.Ш., Керимбаева С.А., Мурадилов Р.М.
И. Раззаков ат. КМТУ

Макалада фронталдык бурчтуу өзгөрүүчү ковштуу телескоптук өзгөрүүчү жумушчу органдары бар бульдозер-жүктөгүчтү түзүү долбоорунун иштелип чыгарылып жаткан иш режимдери каралат. Жумушчу органдардын масса борборлорунун ташылып өтүүчү, салыштырмалуу жана абсолюттук кыймылдарын эске алган полярдык

координаттар системасында жазылган математикалык моделдер сунушталды. Алар жалпыланган координаттарда жана жалпыланган ылдамдыктарда, экинчи тартиптеги квазисызыктуу ыңгайлуу көп өлчөмдүү теңдемелер системасын беришет. Кыймылдын маанилүү эки этабынын бири үчүн Эйлердин сандык ыкмасы колдонулду. Маселени чечүүнүн жалпы алгоритми жана программасы ишке ашырылган. Алынган результаттар чечимдердин жыйналуучулугун көрсөтүшөт.

***Баштапкы сөздөр*:** Өзгөчө кырдаалдар, бульдозер-жүктөгүч, квази сызыктуу теңдемелер системасы, сыпаттаманын математикалык моделдери, Эйлер методу, жалпыланган чоңдуктар, дифференциалдык теңдемелер, алгоритмдер.

COMPUTER PROCESSING IN SOLVING MECHANICS PROBLEMS USING QUASI-LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS

Isakov K.I., Osmonov K.T., Altybaev A.Sh,
Kerimbaeva S.A., Muradilov R.M.
KSTU n.a. I. Razzakov

The article examines the operating modes of the project under development to create a bulldozer-loader with telescopically adjustable working units and a front-mounted, angularly adjustable bucket. Mathematical models have been proposed, formulated in a polar coordinate system, which take into account the translational, relative, and absolute movements of the centers of mass of the working units. They provide a convenient system of quasilinear multidimensional second-order equations in generalized coordinates and generalized velocities. For one of the two important stages of the motion, the Euler numerical method was used. A general algorithm and a program for solving the problem have been developed and implemented. The obtained results demonstrate the convergence of the solutions.

***Keywords**:* emergency situations, bulldozer-loader, system of quasilinear equations, mathematical models of description, Euler's method, generalized quantities, differential equations, algorithms.

Для повышения эффективности дорожно-строительных машин (ДСМ) использования многофункциональных оборудований является целесообразным, и возникает необходимость разработки и создания машины и оборудования с трансформирующим рабочим органом, которые путем манипуляций рабочими органами преобразовываются для выполнения одного вида работы к другому или одновременному их совершению. В горных автодорожных условиях Кыргызской Республики (КР) и других стран потребности в улучшенных многофункциональных ДСМ только растут. В связи с ухудшением погодных условий в Кыргызстане проводятся активные работы по очистке дорог от снега.

Об этом сообщила пресс-служба Министерства транспорта и коммуникаций КР. Госпредприятия "Кыргызавтожол-Юг" и "Кыргызавтожол-Север" работают круглосуточно, осуществляя подсыпку инертных материалов для улучшения проходимости.

Проблемы создания и усовершенствования ДСМ с многофункциональными рабочими органами даже без того, что все время происходят чрезвычайные ситуации, имеют безусловную актуальность. Теоретические изучения законов движения рабочих органов ДСМ в системе многомерных дифференциальных уравнений позволяют заранее определить ряд неизвестных важнейших параметров, благодаря которым обосновываются даже целесообразность и необходимость исследования. Из многих случаев данных можно привести некоторые: селевые процессы в Боомском ущелье (рис. 1).



Рис. 1. Селевые процессы в Боомском ущелье. На участках автодороги.



Рис. 2. На участках автодороги работы по очистке дорог от снега.

В связи с ухудшением погодных условий в Кыргызстане проводятся активные работы по очистке дорог от снега. Об этом сообщила пресс-служба Министерства транспорта и коммуникаций Кыргызской Республики. Государственные предприятия "Кыргызавтожол-Юг" и "Кыргызавтожол-Север" работают

круглосуточно, осуществляя подсыпку инертных материалов для улучшения проходимости.

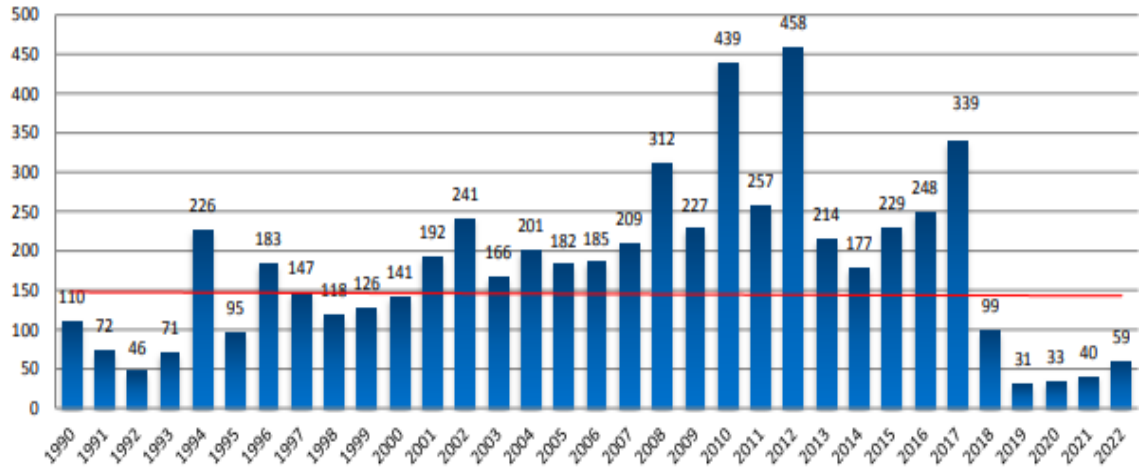


Рис. 3. Общее количество чрезвычайных ситуаций за 1990-2022 годы.

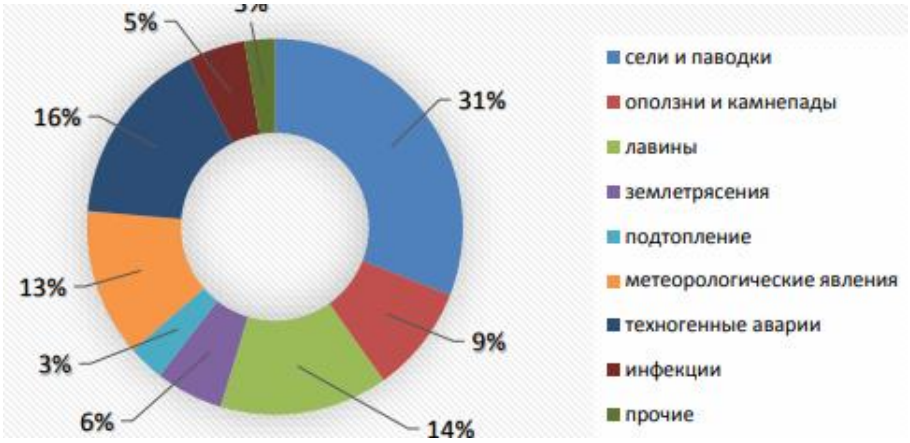


Рис. 4. Общее количество чрезвычайных ситуаций за 1990-2022 годы.

В рисунке 3 приведено графическое представление общего количества чрезвычайных ситуаций за 1990-2022 годы, а на рисунке 4 круговой график долей распределения зарегистрированных чрезвычайных ситуаций, связанных с основными видами опасных природных и техногенных процессов за период 1990-2022 годы.

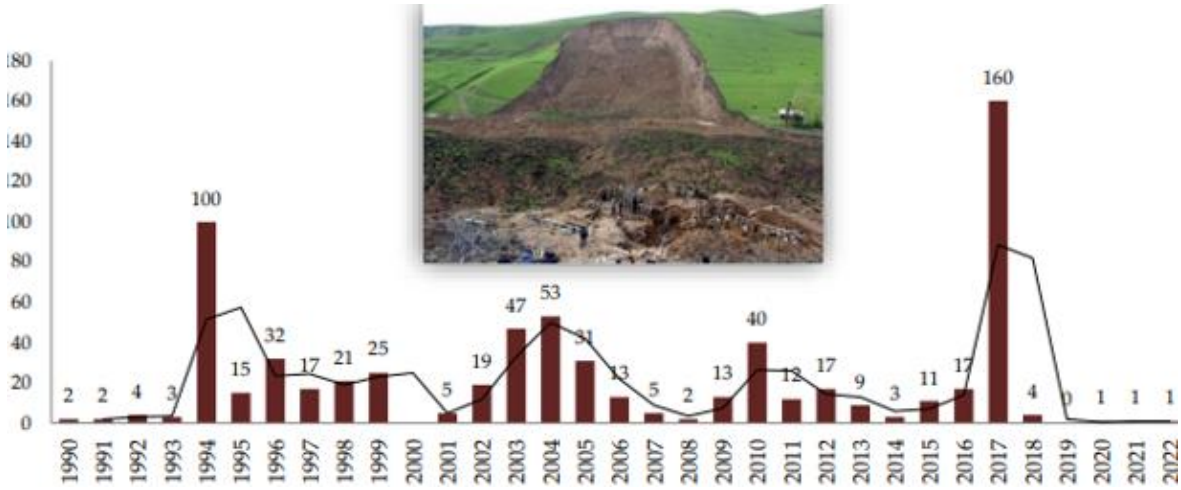


Рис. 5. ЧС связанные с оползневыми процессами за 1990-2022 годы.

За тот же период времени приведен отдельный график чрезвычайных ситуаций связанные с оползневыми процессами на рисунке 5. Одноковшовый погрузчик представляет собой самоходное шасси с короткой стрелой, на конце которой шарнирно закреплен ковш. Черпание породы происходит при опущенной стреле под действием усилия ходового механизма или под действием гидравлического напора при застопоренном ходовом механизме. После наполнения ковш слегка поднимается, и погрузчик отъезжает к месту разгрузки. Различают разгрузчики неповоротные (ковш при разгрузке не поворачивается), полуповоротные и полноповоротные.

Рабочее оборудование, смонтированное на базовой машине содержит телескопические толкающие брусья, которые состоят из двух частей: основные (не выдвигаемые); дополнительные (выдвигаемые). Последние, в свою очередь, состоят из соединенных между собой через шарниры хвостовой и передней частей. Рабочий цикл включает следующие операции: 1) наполнение ковша, 2) подъем ковша в транспортное положение, 3) перемещение погрузчика к месту разгрузки, 4) разгрузку ковша, 5) возвращение погрузчика в забой. Будем рассматривать математическую модель описания этапа пока еще не полного вывода телескопически движущегося органа бульдозера-погрузчика (второй этап) по обобщенным координатам:

$\varphi = \varphi(t)$; $r = r(t)$; $r_4 = r_4(t)$; $\beta = \beta(t)$; предпочтение дается выбору полярной системы координат. $\theta = \theta(t)$ учитывается в третьем этапе.

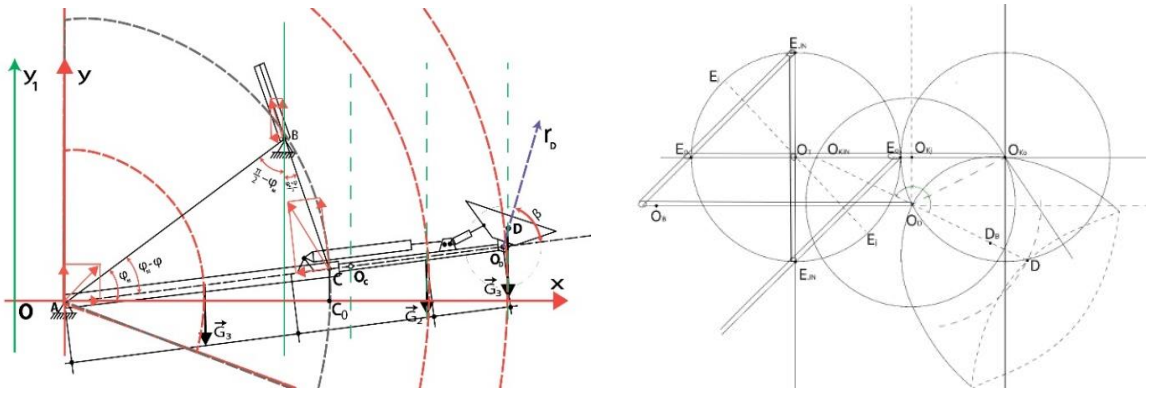


Рис. 6. Схема второго этапа работы бульдозера-погрузчика.

На *втором этапе* за начальный момент времени можно считать t_A, а за конечный момент времени - t_r, где $t_A \le t \le t_r$. Изменение угла поворота поднятия-опускания $\varphi(t)$ характеризует переносное движение для изменения величин $r(t)$ и $\beta(t)$, а в свою очередь, изменение $r(t)$ характеризует относительное движение положения звена по полярной оси r. Изменение угла поворота ковша $\beta(t)$ характеризует относительное движение, помимо переносного движения, обусловленного изменением $\varphi(t)$, зависит от переносного движения связанного с изменением $r(t)$. Пределы изменения по трем обобщенным координатам φ, r, β и по трем обобщенным скоростям

$\dot{\varphi}$, $\dot{r}$, $\dot{\beta}$ при изменении параметра по времени $t_A \le t \le t_r$:

$$\varphi_A \le \varphi \le \varphi_r, \quad \varphi_r \le \varphi_M; \quad \varphi(t_A) = \varphi_A; \quad \varphi(t_r) = \varphi_r, \qquad (1)$$

$$\dot{\varphi}_A \le \dot{\varphi} \le \dot{\varphi}_r, \quad \dot{\varphi}(t_A) = \dot{\varphi}_A; \quad \dot{\varphi}(t_r) = \dot{\varphi}_r, \qquad (2)$$

$$r_A \le r \le l_2, \quad r(t_A) = r_A; \quad r(t_r) = l_2, \qquad (3)$$

$$\dot{r}_A \le \dot{r} \le \dot{r}_r, \quad \dot{r}(t_A) = \dot{r}_A; \quad \dot{r}(t_r) = \dot{r}_r, \qquad (4)$$

$$\beta_A \le \beta \le \beta_r, \quad \beta(t_A) = \beta_A; \quad \beta(t_r) = \beta_r, \qquad (5)$$

$$\dot{\beta}_A \le \dot{\beta} \le \dot{\beta}_r, \quad \dot{\beta}(t_A) = \dot{\beta}_A; \quad \dot{\beta}(t_r) = \dot{\beta}_r, \qquad (6)$$

выбираются исходя из их технического удобства эксплуатации дорожно-строительной машины и функционального назначения ее рабочих органов.

Рассмотрим первоначальное положение системы (рис. 6). Наименьшее число параметров необходимое для задания возможного положения системы называется числом ее независимых обобщенных координат. Приведем формулы для кинетических энергий звеньев системы ДСМ в обобщенных координатах φ, r,β и обобщенных скоростях $\dot{\varphi}$, $\dot{r}$, $\dot{\beta}$, которые имеют вид:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{1}{2} m_1 [(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \frac{\pi}{4}))^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \dot{r}^2 + l_D^2 \cdot \dot{\beta}^2] + \frac{1}{2} m_2 [(l_3 + r_0 + r)^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + \dot{r}^2] + \frac{1}{2} m_3 l_3^2 \cdot \dot{\varphi}^2. \quad (7)$$

Для механической системы с голономными идеальными и удерживающими связями уравнения Лагранжа второго рода [1]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \tag{8}$$

где q_i - обобщенные координаты системы ($q_1 = \phi$, $q_2 = r$, $q_3 = \beta$); n - число степеней свободы; $\dot{q}_i$ - обобщенные скорости ($\dot{q}_1 = \dot{\varphi}$, $\dot{q}_2 = \dot{r}$, $\dot{q}_3 = \dot{\beta}$);
Q_i - обобщенные силы системы. Далее, имея конкретное значение кинетической энергии по (7) будем определить частные производные:

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = 0; \qquad \frac{\partial T}{\partial r} = [m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4})) + m_2(l_3 + r_0 + r)]\cdot \dot{\varphi}^2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial \beta} = m_1 [l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4})]\sqrt{2} l_D \cos(\beta - \tfrac{\pi}{4})\cdot \dot{\varphi}^2; \tag{9}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} = [m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))^2 + m_2(l_3 + r_0 + r)^2 + m_3 l_3^2]\cdot \dot{\varphi};$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{r}} = (m_1 + m_2)\dot{r}; \qquad \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = m_1 l_D^2 \dot{\beta}; \tag{10}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}}\right) = [m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))^2 + m_2(l_3 + r_0 + r)^2 + m_3 l_3^2]\cdot \ddot{\varphi} + 2[m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))(\dot{r} + \sqrt{2} l_D \cos(\beta - \tfrac{\pi}{4})\dot{\beta}) + m_2(l_3 + r_0 + r)\dot{r}]\dot{\varphi};$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{r}}\right) = (m_1 + m_2)\ddot{r}; \qquad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}}\right) = m_1 l_D^2 \ddot{\beta}. \tag{11}$$

Зная силы весов $\vec{G}_1$, $\vec{G}_2$, $\vec{G}_3$, пары сил с моментами M_A, M_B, M_C, M_D, реакции опорных сил $\vec{P}_B$, $\vec{P}_A$ $\vec{P}_C$, для реакции связей и обобщенных сил будем составить систему уравнений статического равновесия: Момента

$$-[G_3 l_3 + (G_2 + G_1)(l_3 + r_0 + r) + G_1(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4})) + 2P_B l_3 \sin\tfrac{\pi - \varphi_M - \varphi}{2}]\cos\varphi = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{n} M_{A_i} = 0; \quad \sum_{j=1}^{JN} X_j = 0: \quad X_A - (G_3 + G_2 + G_1)\sin\phi - P_B \cos\tfrac{\pi - \varphi - \phi_M}{2} = 0; \tag{12}$$

$$\sum_{j=1}^{JN} Y_j = 0: \qquad Y_A - (G_3 + G_2 + G_1)\cos\varphi + P_B \sin\tfrac{\pi - \varphi - \varphi_M}{2} = 0,$$

из которых можно определить реакции связей:

$$P_B = \frac{1}{2 l_3 \sin\frac{\pi - \varphi_M - \varphi}{2}}[G_3 l_3 + G_2(l_3 + r_0 + r) + G_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))];$$

$$X_A = (G_3 + G_2 + G_1)\sin\varphi + P_B \cos\tfrac{\pi - \varphi - \phi\varphi_M}{2}\cdot\sin\tfrac{\varphi + \varphi_M}{2}; \tag{13}$$

$$Y_A = (G_3 + G_2 + G_1)\cos\varphi - P_B \sin\tfrac{\pi - \varphi - \varphi_M}{2}\cdot\cos\tfrac{\varphi + \varphi_M}{2}.$$

При движении данные силы совершат работу: $A = -[G_3 l_3 + (G_2 + G_1)(l_3 + r_0 + r) + G_1(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))]\sin\varphi + 4P_B l_3(\sin\tfrac{\varphi_M}{2} - \sin\tfrac{\varphi_M - \varphi}{2})$. (14)

Принцип возможных перемещений позволяет получить:

$$\delta A = \sum_{i=1}^{n} Q_i \delta q_i = Q\varphi\delta\varphi + Qr\delta r + Q\beta\delta\beta = -[G_3 l_3 + (G_2 + G_1)(l_3 + r_0 + r) + G_1(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))]\cos\varphi\delta\varphi - (G_2 + G_1)\sin\varphi\delta r - G_1 \tfrac{1}{\sqrt{2}} l_D \sin(2\beta - \tfrac{\pi}{2})\sin\varphi\delta\beta, \tag{15}$$

Отсюда определяются конкретные значения:

$$Q\phi = - g\,[m_3 l_3 + (m_2 + m_1)(l_3 + r_0 + r) + m_1(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))]\cos\delta;$$

$$Qr = - g\,(m_1 + m_2)\sin\varphi; \qquad (16)$$

$$Q\beta = - g\, m_1 \tfrac{1}{\sqrt{2}} l_D \sin(2\beta - \tfrac{\pi}{2})\sin\varphi.$$

Тогда с учетом равенств (9), (11), (13) и (16), напишем систему трех уравнений Лагранжа второго рода (8), которые имеют сложные квазилинейные виды

$$\ddot{\beta} = [l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4})]\tfrac{1}{l_D}\cos(\beta - \tfrac{\pi}{4})\cdot \dot{\phi}^2 - g\tfrac{1}{\sqrt{2}\, l_D}\sin(2\beta - \tfrac{\pi}{2})\sin\varphi; \quad (17')$$

$$\ddot{r} = [l_3 + r_0 + r + \frac{m_1}{m_1 + m_2}(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))]\cdot \dot{\varphi}^2 - g\sin\varphi; \qquad (17'')$$

$$\ddot{\varphi} = -\frac{B}{Z}\cdot \dot{\varphi} - \frac{D}{Z}\cos\varphi, \qquad (17''')$$

где для сокращенной записи последнего уравнения (17‴), обозначили

$$B = 2[m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))(\dot{r} + \sqrt{2} l_D \cos(\beta - \tfrac{\pi}{4})\dot{\beta}) +$$

$$+ m_2(l_3 + r_0 + r)\dot{r}]; \qquad (18)$$

$$D = g\,[m_3 l_3 + (m_2 + m_1)(l_3 + r_0 + r) + m_1(l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))]\cos\varphi; \qquad (19)$$

$$Z = m_1(l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \tfrac{\pi}{4}))^2 + m_2(l_3 + r_0 + r)^2 + m_3 l_3^2. \qquad (20)$$

При расчетах эти коэффициенты (18) - (20) легко вычисляются. Последовательным вычислениям поддаются и правые части основных уравнений системы (17′) - (17‴).

Далее, в начальном моменте времени производятся расчеты сравнения сил статического состояния. Предварительно оцениваются величины прилагаемых сил, которые могли бы сообщать движения соответствующим звеньям механизмов [4, 5]. Для замены P_{B_h} будем определить максимального значения P_{Bmax} из всех значений в поле силы P_B, чтобы разности с противоположным вектором суммарных сил тяжести соответствовали направлению движения подъема. А процесс разгрузки ковша проводится в обратной последовательности. Тогда следует определить P_{Bmin} из всех значений в поле силы P_B, чтобы разности с противоположным вектором суммарных сил соответствовали направлению опускания [4].

Найти сил прямого и обратного движения гидроцилиндров остальных обобщенных переменных можно определить аналогично.

Используем полярную систему координат (r,φ) с началом в точке А. Это движение включает в себе: поступательное движение по оси r с началом относительной координаты С, также по отношению к этому переносному движению относительное вращательное движение с полярной системой координат (r_D,β) с центром в точке O_D, где r_D- радиус-вектор. O_DD = l_D может быть переменной величиной, так как процесс

заполнения или опорожнения ковша происходит с течением не мгновенно. Составляя уравнение равновесия моментов пары сил действующих в системе (r_D,β), получим

$\sum_{j=1}^{jn} M_{O_D j}$ = 0: $P_D l_D \sin(\beta) - G_1 l_D \sin(\beta) = 0$, (21)

$P_D = G_1 = m_1 g$, $m_1 = m_{ковш} + m_{груз}$. (22)

Аналогично, заменяем P_{D_h} сначала на максимальное значение P_{Dmax} из всех значений в поле сил P_{D_i}, чтобы разности с противоположным вектором суммарных моментов сил соответствовали направлению подъема, затем, для его опускания на значение P_{Dmin} из всех значений в поле тех же сил P_{D_i}.

Рассматривая движение по оси *r* с началом координаты С, включающее и относительное вращательное движение с системой координат (r_D,β) с центром в точке O_D. Исходя из поступательно-прямолинейных переносных движений, будем составить уравнение равновесия векторов сил вдоль оси *r*

$\sum_{k=1}^{KM} R_k$ = 0: $P_R \cos\phi - (G_2 + G_1 \cos(\beta)) \cos\varphi = 0$, (23)

$P_R = G_1 \cos(\beta) + G_2 = (m_1 + m_2 \cos(\beta))g$, $m_1 = m_{ковш} + m_{груз}$. (24)

Аналогично вышеприведенным будем определить максимальное $P_{R_{max}}$ из поля сил P_R, для подъема, а для обратной последовательности определяется минимальное значение P_{Rmin} из значений в поле сил P_R.

Определяя результирующие силы приводов в движение механической системы ДСМ: P_{Bmax}; P_{Bmin}; P_{Dmax}; $P_{D_{min}}$; $P_{R_{max}}$; P_{Rmin}, будем написать систему квазилинейных дифференциальных уравнений вторых порядков, полученные использованием уравнений Лагранжа второго рода [1, 3] с учетом этих результирующих сил привода.

$\ddot{\phi} = -\frac{B}{Z} \cdot \dot{\varphi} - \frac{\bar{P}_{Bmax}}{Z} \cos\varphi$,

$\ddot{r} = [l_3 + r_0 + r + \frac{m_1}{m_1+m_2} (l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \frac{\pi}{4}))] \cdot \dot{\phi}^2 + (\bar{P}_{R_{max}} - g)\sin\varphi$; (25)

$\ddot{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{l_D} [l_3 + r_0 + r + l_1 + \sqrt{2} l_D \sin(\beta - \frac{\pi}{4})]\cos(\beta - \frac{\pi}{4}) \cdot \dot{\varphi}^2 + [\bar{P}_{D_{max}} - g\frac{\sqrt{2}}{l_D} \cos(\beta - \frac{\pi}{4})]\sin\varphi$

с начальными и конечными условиями в пределах обобщенных переменных при $t_A \le t \le t_r$: (1) - (6). Для введения характерных величин по t и его шага по $\dot{\beta}$ и β; $\dot{\phi}$ и ϕ, $\dot{r}$ и r в уравнениях системы, допустим сопоставляя:

$T_\phi = \sqrt{\frac{2l_3}{g}}$; $T_r = \sqrt{\frac{l_3+l_1}{g}}$; $T_\beta = \sqrt{\frac{l_D}{g}}$, (26)

$t_\beta = {}^{T_\beta}\bar{t}$; $t_\varphi = {}^{T_\varphi}\bar{t}$; $t_r = {}^{T_r}\bar{t}$, (27)

$\Delta t_\beta = T_\beta \Delta\bar{t}$; $\Delta t_\phi = T_\phi \Delta\bar{t}$; $\Delta t_r = T_r \Delta\bar{t}$, (28)

где $\bar{t}$- безразмерное время, t_ϕ, t_r,t_β - времени соразмерные T_ϕ, T_r, T_β.

Уравнениям системы (25) с начальными условиями (1) - (6), без преобразований используется метод стрельбы, представляющий собой пару вложенных методов: внешний — для решения нелинейного, внутренний — линейного уравнения сводит решение задачи к решению двух вложенных задач Коши [2, 4]. Используется дважды повторяемый: явный метод Эйлера; метод Эйлера-Коши; и/или метод Рунге-Кутта.

Нестационарные движения рабочих органов ДСМ способных выполнять множество функций учета параметров пространственных обобщенных координат и обобщенных скоростей из-за относительных, переносных взаимных расположений целостного движения предусмотрены деления области изменения по (ϕ, r, β) к дискретным значениям ($\phi^{п}_{i,j,k}$, $\beta^{п}_{i,j,k}$, $r^{п}_{i,j,k}$), а от непрерывных величин ($\dot{\phi}$,$\dot{\beta}$, $\dot{r}$) к дискретным узловым ($\dot{\phi}^{п}_{i,j,k}$,$\dot{\beta}^{п}_{i,j,k}$, $\dot{r}^{п}_{i,j,k}$).

Для статического состояния можно обозначать и подсчитать по формулам поля распределения активных сил привода в точках *D*; *B*; *R*:

$P_{D_{i,j,k}}$=P_D ($\phi^{1}_{i,j,k}$,$\beta^{1}_{i,j,k}$, $r^{1}_{i,j,k}$); $P_{B_{i,j,k}}$=P_B ($\varphi^{1}_{i,j,k}$,$\beta^{1}_{i,j,k}$,$r^{1}_{i,j,k}$); $P_{R_{i,j,k}}$=P_R ($\phi^{1}_{i,j,k}$,$\beta^{1}_{i,j,k}$,$r^{1}_{i,j,k}$) .

Здесь верхние индексы – индексы по времени в начальном *n* = 1.

Введем дискретные узловые значения по формулам:

$\beta^{п}_{i,j,k}$=$\beta^{п}_{i,j-1,k}$+$\Delta\beta$, *j* = 2,3,…, *JM*, *i* = 1,2, …, *IM*, *k* = 1,2,…,*KM*, (29а)

$\varphi^{п}_{i,j,k}$=$\varphi^{п}_{i-1,j,k}$+$\Delta\phi$, *i* = 2, , …, *IM*, *j* = 1,2,…, *JM*, *k* = 1,2,…, *KM*, (29б)

$r^{п}_{i,j,k}$=$r^{п}_{i,j,k-1}$+Δr, *k* = 2,3,…, *KM, i* = 1, 2, …, *IM*, *j* = 1,2,…, *JM*, (29в)

где *n* = 1, 2, …, *N*, а шаги по обобщенным координатам представляются:

$$\Delta\varphi = (\varphi^{п}_{IM,j,k} - \phi^{п}_{1,j,k})/(IM-1);$$
$$\Delta\beta = (\beta^{п}_{i,JM,k} - \beta^{п}_{i,1,k})/(JM-1); \quad (30)$$
$$\Delta r = (r^{п}_{i,j,KM} - r^{п}_{i,j,1})/(KM-1).$$

В основе метода Эйлера лежит идея графического построения решения дифференциальных уравнений, однако этот метод дает одновременно и способ нахождения искомой функции в численной (табличной) форме. Построим, начиная с точки t_1= t_A, узловые значения $t_1 \le t_п \le t_N$, выбрав шаг по времени

$$\Delta t = (t_N - t_1)/(N-1), \quad t_п = t_1 + (n-1)\Delta t \quad (n = 1, 2, \ldots, N), \quad (31)$$

Так как все три уравнения являются обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка, причем в каждом из них вторые производные содержатся отдельно, подтверждая

квазилинейности, и, каждого из них можно записать в виде систем двух уравнений первых порядков, по структуре метода стрельбы

$$\dot{\varphi}^{П}_{i,j,k}=\dot{\phi}^{П-1}_{i,j,k}-\Delta t \quad [{}^{BCH^{n-1}_{i,j,k}}\dot{\phi}^{П-1}_{i,j,k}+ (DCH^{П-1}_{i,j,k}-\bar{P}_{Bmax})\cos\varphi^{П-1}_{i,j,k}]/Z^{П-1}_{i,j,k}; \qquad (32)$$

$$\dot{\beta}^{П}_{i,j,k}= \dot{\beta}^{П-1}_{i,j,k}+\Delta t \quad \{{}^{\Re BE^{n-1}_{i,j,k}}\frac{\sqrt{2}}{l_D}\cos(\beta^{П-1}_{i,j,k}-\frac{\pi}{4})\cdot \dot{\varphi}^{П-1\,2}_{i,j,k}+$$

$$+ [\bar{P}_{D_{max}}- g\frac{\sqrt{2}}{l_D}\cos(\beta^{П-1}_{i,j,k}-\frac{\pi}{4})]\sin\varphi^{П-1}_{i,j,k}\}; \qquad (33)$$

$$\dot{r}^{П}_{i,j,k}=\dot{r}^{П-1}_{i,j,k}+\Delta t \quad [(\Re 2^{П-1}_{i,j,k}+\frac{m_1}{m_1+m_2}BE^{П-1}_{i,j,k})\cdot \dot{\varphi}^{П-1\,2}_{i,j,k} + (\bar{P}_{R_{max}}- g)\sin\varphi^{П-1}_{i,j,k}], \qquad (34)$$

с соответствующими начальными условиями

$$\dot{\varphi}^{1}_{i,j,k}= \varphi_A, \qquad \dot{\beta}^{1}_{i,j,k}= \dot{\beta}_A, \qquad \dot{r}^{1}_{i,j,k}= \dot{r}_A.$$

А потом, аналогично, повторяя процесс записи по формулам

$$\dot{\beta}= \frac{d\beta}{dt}; \qquad \dot{r}=\frac{dr}{dt}; \ \dot{\phi}= \frac{d\varphi}{dt}, \qquad (35)$$

получив следующие записи:

$$d\beta =\dot{\beta}dt; \quad dr =\dot{r}dt; \quad d\phi =\dot{\varphi}dt, \qquad (35^*)$$

а в разностных соотношениях представляя

$$\Delta\beta =\dot{\beta}\Delta t; \quad \Delta r =\dot{r}\Delta t; \quad \Delta\varphi =\dot{\phi}\Delta t, \qquad (36)$$

и используя (36) для значений из (32), (33) и (34), можно писать

$$\phi^{П}_{i,j,k}=\phi^{П-1}_{i,j,k}+{}^{\Delta t}\ \dot{\phi}^{П}_{i,j,k}, \qquad (37)$$

$$\beta^{П}_{i,j,k}= \beta^{П-1}_{i,j,k} + {}^{\Delta t}\ \dot{\beta}^{П}_{i,j,k}; \qquad (38)$$

$$r^{П}_{i,j,k}=r^{П-1}_{i,j,k}+{}^{\Delta t}\ \dot{r}^{П}_{i,j,k}; \qquad (39)$$

с соответствующими начальными условиями

$$\phi^{1}_{i,j,k}= \phi_A, \qquad \beta^{1}_{i,j,k}= \beta_A, \qquad r^{1}_{i,j,k}= r_A,$$

Здесь для краткости записи используются вспомогательные обозначения

$$\Re 2^{П}_{i,j,k}= l_3 + r_0 +r^{П}_{i,j,k}; \ BE^{П}_{i,j,k}= l_1+\sqrt{2}l_D\sin(\beta^{П}_{i,j,k}-\frac{\pi}{4});$$

$$\Re BE^{П}_{i,j,k}=\Re 2^{П}_{i,j,k}+BE^{П}_{i,j,k}; \qquad (40)$$

$$PB^{П}_{i,j,k}= g(m_3\, l_3 + m_2\Re 2^{П}_{i,j,k}+ m_1\Re BE^{П}_{i,j,k})/(2l_3\sin\frac{\pi-\varphi_M-\varphi}{2}); \qquad (41)$$

$$X^{П}_{A_{i,j,k}}= g(m_3 + m_2+ m_1)\sin\varphi^{П}_{i,j,k} + PB^{П}_{i,j,k}\cos\frac{\pi-\varphi_M-\varphi^{П}_{i,j,k}}{2}\sin\frac{\varphi^{П}_{i,j,k}+\varphi_M}{2}; \qquad (42)$$

$$Y^{П}_{A_{i,j,k}}= - g(m_3 + m_2+ m_1)\cos\varphi^{П}_{i,j,k}+ PB^{П}_{i,j,k}\sin\frac{\pi-\varphi_M-\varphi^{П}_{i,j,k}}{2}\cos\frac{\varphi^{П}_{i,j,k}+\varphi_M}{2}; \qquad (43)$$

$$BCH^{П}_{i,j,k}= 2[m_1\Re BE^{П}_{i,j,k}\ (\dot{r}^{П}_{i,j,k}+\sqrt{2}l_D\cos(\beta^{П}_{i,j,k}-\frac{\pi}{4})\dot{\beta}^{П}_{i,j,k})+m_2\,{}^{\Re 2^{n}_{i,j,k}}\dot{r}^{П}_{i,j,k}]; \qquad (40а)$$

$$DCH^{П}_{i,j,k} = g[m_3\, l_3 + (m_2 + m_1)\,\Re 2^{П}_{i,j,k}+ m_1\Re BE^{П}_{i,j,k}]; \qquad (40б)$$

$$Z^{П}_{i,j,k}= m_1\Re BE^{П\,2}_{i,j,k} + m_2\Re 2^{П\,2}_{i,j,k} + m_3 l_3^2. \qquad (40в)$$

На основе вышеизложенных формул дважды повторяемого метода Эйлера составлен общий алгоритм и соответствующая программа решения задачи. Для движения рабочих органов бульдозера-погрузчика данный алгоритм рассчитан на организации гибкого управления действиями сил приводов (гидроцилиндров). Приведем один из вариантов плана маневра работы ДСМ в рабочем цикле работ уточнив ранее введенные обозначения: $AC = L_3 = 2l_3$; $AK = KC = L_3/2 = l_3$; $AA_1 = l_{20}$ - длина той части внутренней балки, которая остается внутри внешней балки (стрелы) после выхода части балки $A_1C = L_3 - l_{20}$ вне балки $AC = L_3$ располагаемой в интервале

$O_C O_D = 2l_1$; $l_2 = r_0 + l_1$; $l_2 = r_0 + r_k/2$; $r_k = 2l_1$.

Задача реализована методом Эйлера. Процесс дискретизации системы уравнений включает в себе изменения трех пространственных координат и по времени: i=1,…,IM; j = 1,…, JM; k=1, …, KM; n=1,…,NN.

В расчетах принимались: IM = 11; JM = 11; KM = 11; NN = 11, а при мелких сеточных значениях IM = 21; JM =21; KM = 21; NN = 21. В текстах программ большое количество переменных параметров представляется четырехмерным массивом, например $\dot{\beta}^{n}_{i,j,k}$ идентифицируется как B1[I,J,K,N], а других обобщенных скоростей и обобщенных координат вместе с временным шагом временными узловыми значениями упоминаются и приводятся в соответствующих табличных и графических данных.

Приведем вкратце при некоторых исходных данных выходные данные результата отладки программы на языке ABC Паскаль. Результаты были получены таблично, а соответствующие графические данные доработаны с помощью MS EXCEL или на языке Питон.

Для теоретически допустимых величин, близкие к нагрузкам ДСМ зная, g = 9,81, при: m_1 = M1; m_2 = M2; m_3 = M3; l_1 = L1; l_D = LD; r_0 = R20; l_3 = L3; и других, выводятся значения:P_{Bmin},P_{Bmax}, P_{Rmin},$P_{R_{max}}$,$P_{R_{max}}$,$P_{D_{min}}$, P_{Dmax}.

Далее по вертикали выводятся табличные значения при изменении шага по t_n в 11 (или 21) узлах, то есть для n = 1, 2,…, 11; а по горизонтали изменяются в указанных наверху узлах по j или i, в нижеследующих пояснительных и значащих числовых данных.

Ниже были приведены одного из результатов проведенных расчетов выходных данных в виде табличных значений одного из обобщенных угловых скоростей $\dot{\beta}^{n}_{1,j,1}$= B1[I1,j,1,N] при изменении шага по времени, соответствующие значениям по вертикали n = 1, 2, …, 21, а по горизонтали указаны изменения индекса j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

M1=2500.000 M2= 150.000 M3= 340.000 HB= 3.000
L1= 2.400 L3= 2.500 LD= 0.800 R20= 0.200

PBMI:8:3	IBMI:3	PBMA:8:3	IBMA:3	PRMI:8:3	IRMI:3
9.096	1	37.698	21	0.000	1

PRMA:8:3	IRMA:3	PDMI:8:3	IDMI:3	PDMA:8:3	IDMA:3
8.496	21	0.000	1	10.399	1



Рис. 7. Максимальные и минимальные усилия гидроцилиндров.

Соответствующие этим табличным значениям в рисунке 8 был составлен график функции семейства значений $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$.

Значения обобщенных скоростей B1[I1,j,1,N], для j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7:
B1[I1,1,1,N]:8:3, B1[I1,2,1,N]:8:3, B1[I1,3,1,N]:8:3, B1[I1,4,1,N]:8:3, B1[I1,5,1,N]:8:3, B1[I1,6,1,N]:8:3, B1[I1,7,1,N]:8:3

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.023	-0.034	-0.045	-0.054	-0.062	-0.070	-0.075
-0.046	-0.069	-0.089	-0.108	-0.124	-0.139	-0.150
-0.067	-0.101	-0.133	-0.161	-0.185	-0.206	-0.224
-0.087	-0.132	-0.174	-0.211	-0.244	-0.272	-0.296
-0.105	-0.161	-0.213	-0.259	-0.300	-0.335	-0.365
-0.119	-0.186	-0.248	-0.303	-0.353	-0.395	-0.430
-0.130	-0.208	-0.279	-0.344	-0.401	-0.451	-0.492
-0.137	-0.225	-0.306	-0.380	-0.445	-0.502	-0.549
-0.140	-0.238	-0.329	-0.411	-0.484	-0.548	-0.601
-0.138	-0.246	-0.346	-0.437	-0.518	-0.588	-0.648
-0.132	-0.250	-0.358	-0.457	-0.545	-0.623	-0.689
-0.121	-0.248	-0.365	-0.472	-0.568	-0.652	-0.724
-0.106	-0.241	-0.367	-0.481	-0.584	-0.675	-0.753
-0.087	-0.230	-0.363	-0.485	-0.595	-0.692	-0.776
-0.065	-0.215	-0.355	-0.484	-0.601	-0.704	-0.794
-0.039	-0.196	-0.343	-0.479	-0.602	-0.711	-0.806
-0.010	-0.174	-0.328	-0.469	-0.598	-0.713	-0.814
0.021	-0.150	-0.309	-0.457	-0.591	-0.712	-0.817

0.052	-0.124	-0.288	-0.441	-0.581	-0.706	-0.817
0.085	-0.096	-0.266	-0.424	-0.568	-0.699	-0.814

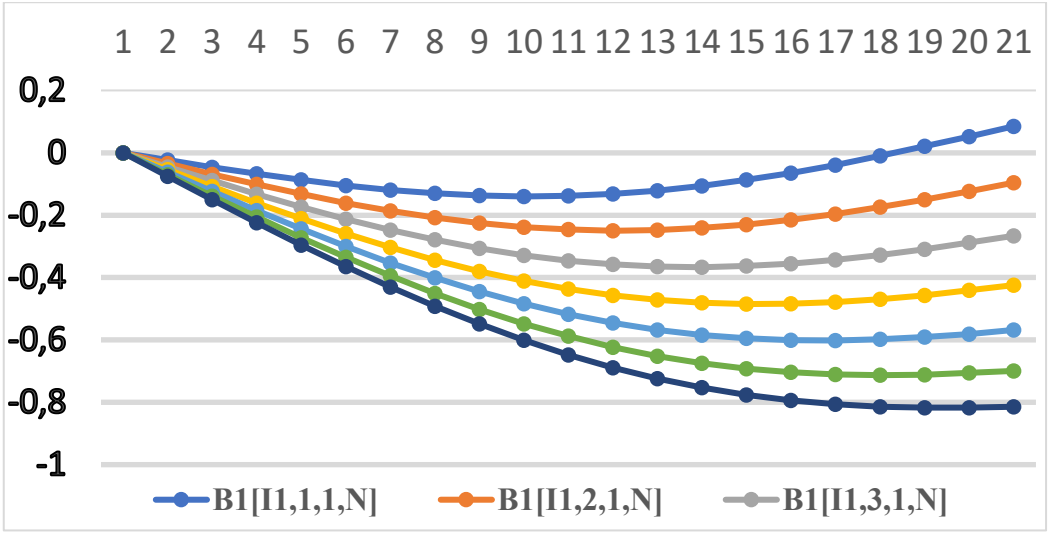


Рис. 8. Обобщенные скорости $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$= B1[1,j,1,N], при *j*=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Здесь наблюдаются тенденция убывания выходных данных.

Для исходных данных, но при использовании *i*=1, 2, …, 11; *j*=1, 2, …, 11, будем далее привести табличные и графические результаты вычислений обобщенных скоростей и обобщенных координат.

Будем сравнивать часть числовых значений полученные удвоенным делением каждого переменного с размерами 21x21, приведем лишь последние 7 значений из 21 по индексным значениям.

Значения скоростей B1[1,j,1,N], для j=1, 3, 5, 7, 9, 11

B1[1,1,1,N]:8:3, B1[1,3,1,N]:8:3, B1[1,5,1,N]:8:3, B1[1,7,1,N]:8:3, B1[1,9,1,N]:8:3, B1[1,11,1,N]:8:3

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.011	0.012	0.012	0.011	0.009	0.007
0.053	0.059	0.058	0.052	0.043	0.032
0.146	0.161	0.157	0.141	0.117	0.089
0.309	0.338	0.329	0.294	0.244	0.187
0.557	0.605	0.588	0.526	0.438	0.337
0.901	0.973	0.943	0.844	0.704	0.544
1.347	1.443	1.394	1.249	1.046	0.813
1.890	2.006	1.931	1.732	1.457	1.139
2.515	2.636	2.528	2.272	1.923	1.516

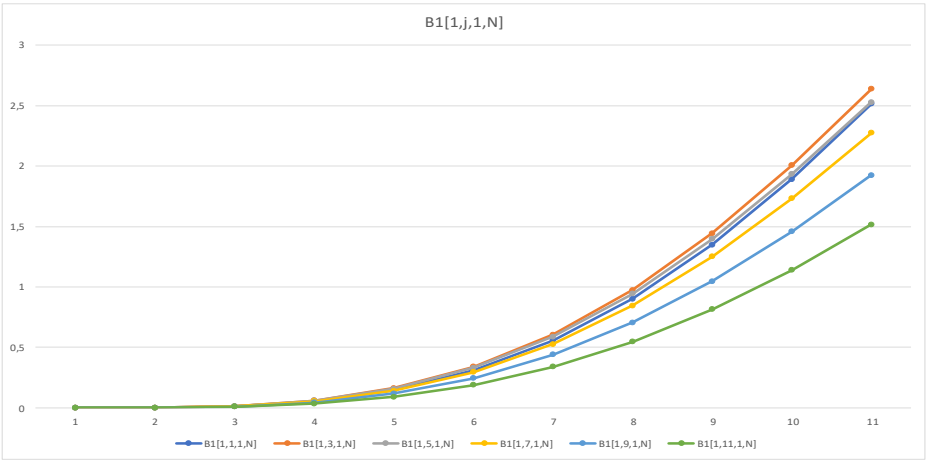


Рис. 9. $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$= B1[1,j,1,N], для значений *j*=1, 3, 5, 7, 9, 11.

На рис. 9 представлены графики $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$= B1[1,j,1,N], для *j*=1, 3, 5, 7, 9, 11.

Для сравнительного анализа с одной стороны, и для определения численного эксперимента с другой стороны будем сравнивать часть числовых значений полученные удвоенным делением каждого переменного с размерами 21x21, приведем лишь последние 7 значений из 21 по индексным значениям.

Значения обобщенных скоростей B1[1,j,1,N], для j=15,16,17,18,19,20,21:
B1[1,15,1,N]:8:3, B1[1,16,1,N]:8:3, B1[1,17,1,N]:8:3, B1[1,18,1,N]:8:3,
B1[1,19,1,N]:8:3, B1[1,20,1,N]:8:3, B1[1,21,1,N]:8:3

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004
0.016	0.015	0.015	0.014	0.013	0.012	0.011
0.034	0.033	0.031	0.029	0.027	0.026	0.024
0.062	0.059	0.056	0.053	0.050	0.047	0.043
0.102	0.097	0.092	0.087	0.082	0.076	0.071
0.155	0.148	0.140	0.133	0.125	0.117	0.108
0.224	0.214	0.203	0.192	0.180	0.169	0.157
0.309	0.295	0.280	0.265	0.249	0.234	0.217
0.413	0.394	0.374	0.354	0.333	0.312	0.291
0.535	0.510	0.485	0.459	0.433	0.405	0.378
0.676	0.645	0.614	0.581	0.548	0.514	0.479
0.836	0.799	0.760	0.720	0.680	0.638	0.595
1.015	0.970	0.924	0.876	0.827	0.777	0.725
1.211	1.159	1.104	1.048	0.990	0.930	0.869
1.422	1.362	1.299	1.234	1.167	1.098	1.027

1.648	1.579	1.508	1.434	1.357	1.278	1.197
1.884	1.808	1.728	1.644	1.558	1.469	1.377
2.128	2.044	1.956	1.864	1.768	1.669	1.567

В рисунке 10 приведены зависимости угловых скоростей $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$ при изменении шага по времени, соответствующие узловым значениям по вертикали *n* = 1, 2, …, 21, а по горизонтальным данным указаны изменения индекса *j* = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

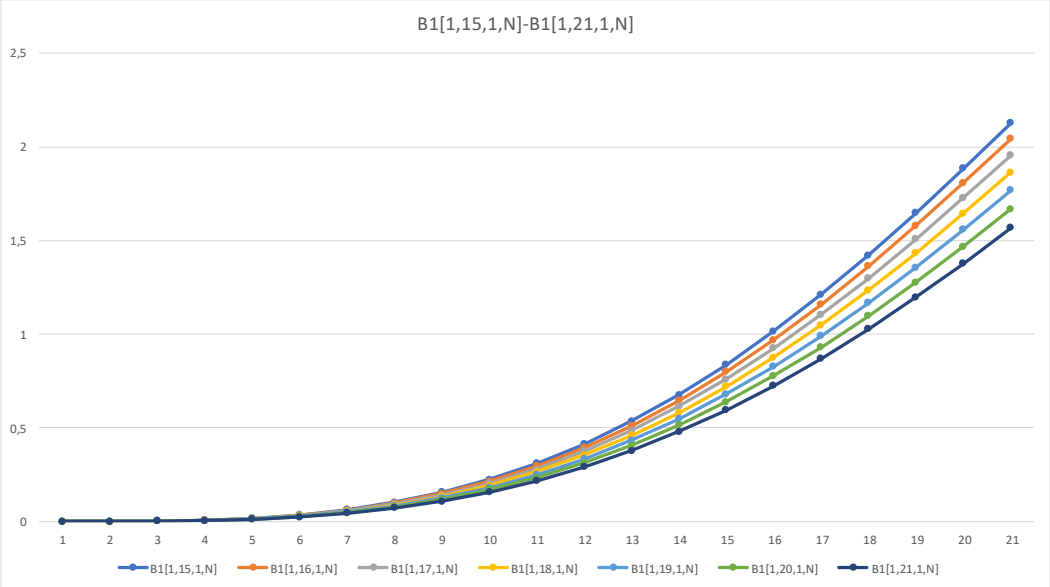


Рис. 10. Угловые скорости $\dot{\beta}^{\Pi}_{1,j,1}$ при *j* = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

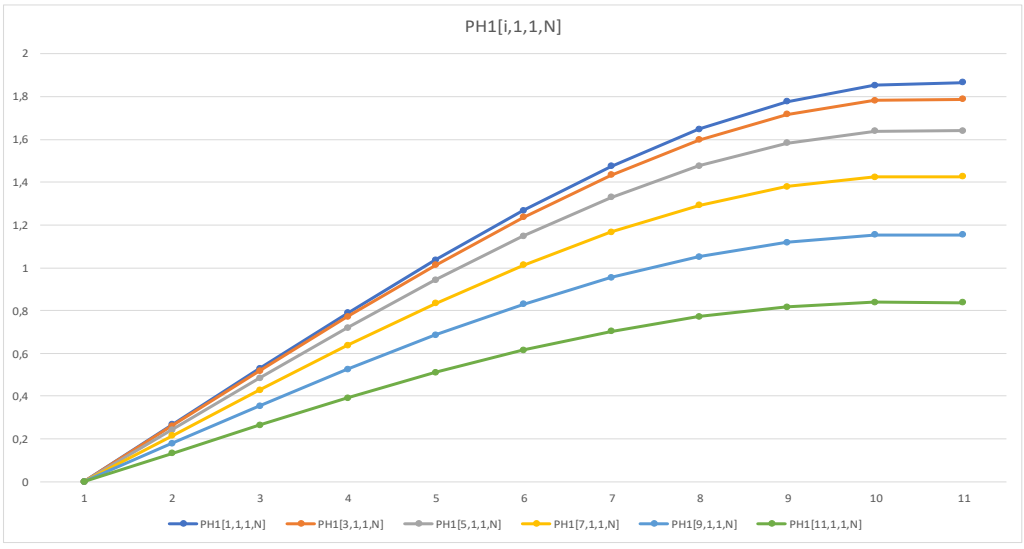


Рис. 11. $\dot{\phi}^{\Pi}_{i,1,1}$= PH1[i,1,1,N], для значений *i*=1, 3, 5, 7, 9, 11.

Аналогично выведены результаты вычисления значений обобщенных скоростей PH1[*i*,1,1,N] для *i*=1, 3, 5, 7, 9, 11, при:
Значения обобщенных скоростей PH1[i,1,1,N], для i=1, 3, 5, 7, 9, 11 :

PH1[1,1,1,N]:8:3, PH1[3,1,1,N]:8:3, PH1[5,1,1,N]:8:3, PH1[7,1,1,N]:8:3, PH1[9,1,1,N]:8:3, PH1[11,1,1,N]:8:3

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.266	0.260	0.243	0.215	0.178	0.133
0.530	0.518	0.484	0.429	0.355	0.265
0.788	0.771	0.719	0.637	0.526	0.392
1.036	1.012	0.943	0.833	0.686	0.510
1.267	1.236	1.149	1.012	0.830	0.615
1.474	1.434	1.330	1.167	0.954	0.703
1.647	1.598	1.477	1.291	1.051	0.771
1.777	1.717	1.582	1.379	1.119	0.816
1.853	1.782	1.638	1.425	1.153	0.838
1.866	1.788	1.640	1.426	1.153	0.836

На рисунке 11 представлено семейство графиков обобщенных скоростей $\dot{\varphi}\backslash_{i,1,1}^{\Pi}$= PH1[i,1,1,N], для *i*=1, 3, 5, 7, 9, 11.

При использовании мелких сеток, будем сравнивать часть числовых значений полученные удвоенным делением каждого переменного с размерами 21x21, приведем лишь последние 7 значений из 21 по индексам.

В рисунке 12 приведены зависимости угловых скоростей $\dot{\varphi}_{i,1,1}^{\Pi}$ при изменении шага по времени, соответствующие узловым значениям по вертикали *n* = 1, 2, …, 21, а по горизонтальным данным указаны изменения индекса *i* = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

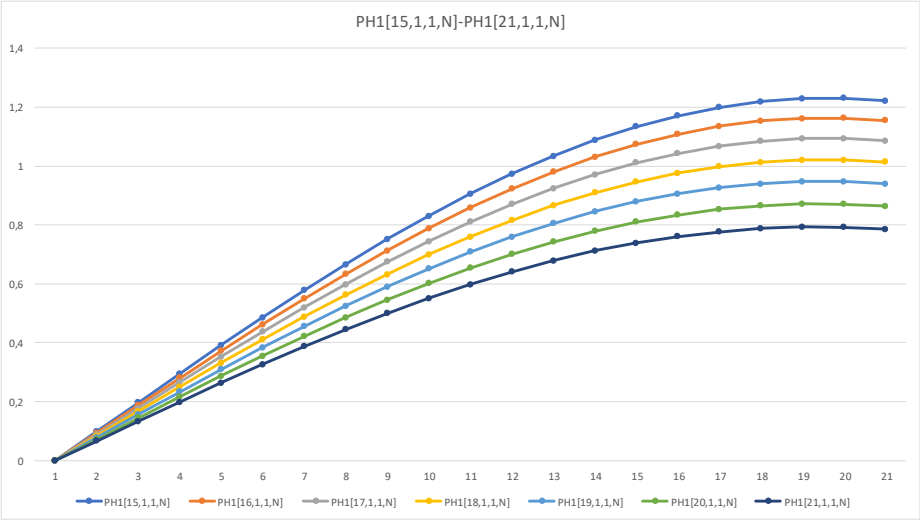


Рис. 12. Зависимость $\dot{\varphi}_{i,1,1}^{\Pi}$ при *i* = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

Значения обобщенных координат B[1,j,1,N], для j=1, 3, 5, 7, 9, 11 : B[1,1,1,N]:8:3, B[1,3,1,N]:8:3, B[1,5,1,N]:8:3, B[1,7,1,N]:8:3, B[1,9,1,N]:8:3, B[1,11,1,N]:8:3

0.000	0.314	0.628	0.942	1.257	1.571
0.000	0.314	0.628	0.942	1.257	1.571
0.000	0.315	0.629	0.943	1.257	1.571
0.002	0.316	0.630	0.944	1.258	1.572
0.006	0.321	0.635	0.948	1.261	1.574
0.015	0.330	0.644	0.957	1.268	1.580
0.031	0.348	0.661	0.972	1.281	1.589
0.056	0.375	0.688	0.996	1.301	1.605
0.095	0.417	0.728	1.031	1.331	1.628
0.149	0.474	0.783	1.081	1.373	1.661
0.221	0.549	0.855	1.146	1.427	1.704

В рисунке 13 приведены обобщенные координаты угловых значений $\beta^{n}_{1,j,1}$ при изменении шага по времени, соответствующие узловым значениям по вертикали n = 1, 2, …, 11, а по горизонтальным данным указаны изменения индекса j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

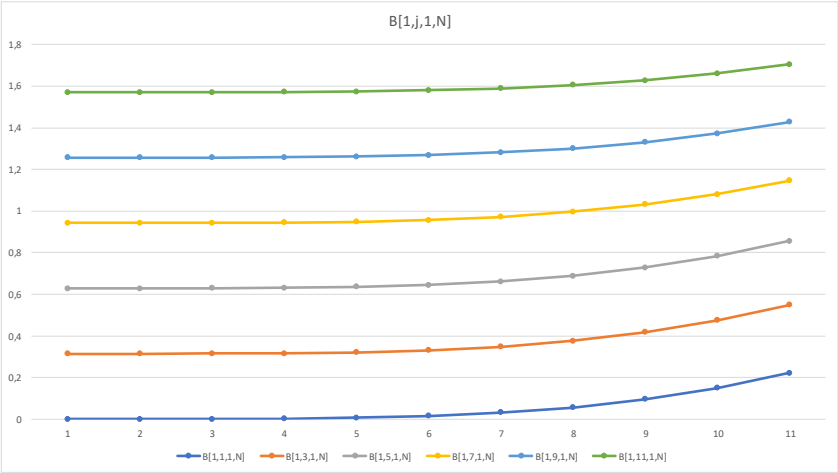


Рис. 13. Зависимость $\beta^{n}_{1,j,1}$ при j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

На рисунке 14 приведены обобщенные координаты угловых значений $\varphi^{n}_{i,1,1}$ при изменении шага по времени, соответствующие узловым значениям по вертикали n = 1, 2, …, 11, а по горизонтальным данным указаны изменения индекса i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Значения обобщенных координат PH[i,1,1,N], для i=1, 3, 5, 7, 9, 11 :
PH[1,1,1,N]:8:3, PH[3,1,1,N]:8:3, PH[5,1,1,N]:8:3, PH[7,1,1,N]:8:3, PH[9,1,1,N]:8:3, PH[11,1,1,N]:8:3

0.000	0.209	0.419	0.628	0.838	1.047
0.000	0.209	0.419	0.628	0.838	1.047
0.019	0.228	0.436	0.644	0.850	1.057
0.057	0.265	0.471	0.674	0.876	1.076
0.113	0.320	0.522	0.720	0.913	1.104
0.187	0.392	0.589	0.779	0.962	1.140

0.277	0.480	0.672	0.851	1.022	1.184
0.383	0.583	0.766	0.935	1.090	1.234
0.500	0.697	0.872	1.027	1.165	1.289
0.627	0.819	0.985	1.125	1.245	1.347
0.759	0.947	1.102	1.227	1.327	1.407

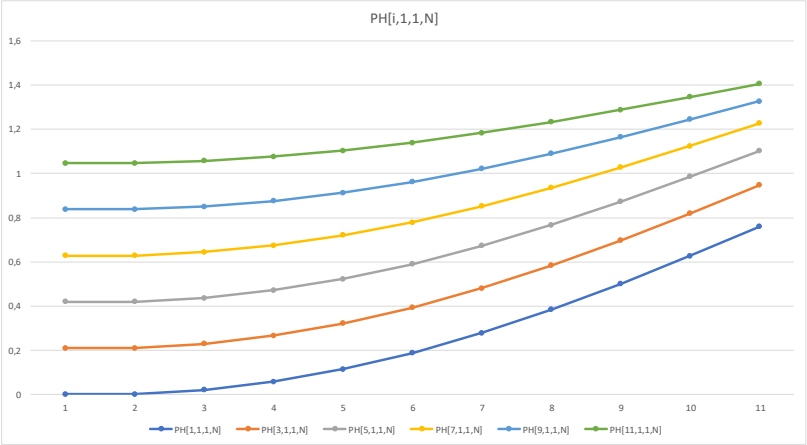


Рис. 14. Зависимость $\varphi^{\Pi}_{i,1,1}$ при i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Для реализации вышеизложенной поставленной задачи, в качестве некоторого конкретного примера были подготовлены исходные данные бульдозера-погрузчика SDLG L956FH. Он – один из самых распространенных моделей фронтальных погрузчиков грузоподъемностью до 5 400кг, который принадлежит к классу тяжелой строительной техники и обладает умеренным уровнем потребления горючего и высокой эффективностью в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах [Текст]: Учебное пособие / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. -М.: Наука, 1968. - 624 с.
2. Заварыкин В.М., Житомирский В.Г., Лапчик М.П. Численные методы: Учеб. пособие для студ. физ.-мат. спец. пед. ин-тов /В.М. Заварыкин и др. – М.: Просвещение, 1990. – 176 с.
3. Исаков К., Осмонов К.Т., Токтакунов Т. Теоретическое исследование задачи разработки бульдозера-погрузчика с трансформирующимся рабочим органом для содержания, ремонта высокогорных автомобильных дорог. Вестник КГУСТА. № 4 вып. 66. Бишкек, 2019. – С. 586-593.
4. Исаков К., Токтакунов Т., Осмонов К.Т., Канатова А.Б. Приложения численных методов решения задачи многофункциональных работ

дорожно-строительных машин в системах нелинейных уравнений с обобщенными координатами. Вестник КГУСТА. № 4 вып. 78. Бишкек, 2022. – С. 1481-1491.

5. Isakov K., Toktakunov T., Osmonov K., Altybaev A. Investigation of the problem of multifunctional work of a bulldozer-loader by reducing the mathematical model to pairwise nested numerical methods. BFT 2023 - International Scientific Conference (Saint-Petersburg, Russia, September 19 - 21, 2023) E3S Web Conf., (2023). **Scopus.**

УДК 004.93

ЭТАЛОННЫЙ КЛАССИФИКАТОР НА БИНАРНЫХ МАТРИЦАХ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ СИМВОЛОВ КЫРГЫЗСКОГО АЛФАВИТА

Бийбосунов Б. И., Халмуратов Б. О.
КГУ им. И. Арабаева

Рассматривается задача распознавания рукописных символов кыргызского алфавита, специфика которой определяется тремя буквами — Ө, Ң и Ү, отличающимися от близких по начертанию О, Н и У лишь малым локальным элементом. Формализован эталонный классификатор, работающий на бинарных матрицах фиксированного размера. Показано, что для бинарных векторов решающее правило по минимуму евклидовой нормы совпадает с правилом по минимуму расстояния Хэмминга, что позволяет заменить арифметику побитовыми операциями и снизить трудоёмкость сравнения с одного эталона до нескольких машинных слов. Введено условие устойчивой различимости близких по начертанию пар и получена модельная оценка площади различающего элемента как функции разрешения сетки. Расчёт показывает, что при сетке 10×10 запас различимости пары «О — Ө» мал, а приемлемое отношение достигается начиная с сетки 28×28. Описана двухкаскадная схема, в которой посимвольное решение уточняется словарной проверкой собранного слова, и архитектура веб-прототипа на Python, Django и PostgreSQL. Работа носит методический характер: приводятся формальное описание метода, оценки сложности и различимости, а также программа измерительного эксперимента, необходимого для количественной проверки полученных оценок.

Ключевые слова: распознавание образов, рукописный текст, кыргызский алфавит, эталонный метод, расстояние Хэмминга, бинарные признаки, вычислительная сложность.

КЫРГЫЗ АЛФАВИТИНИН КОЛ ЖАЗМА СИМВОЛДОРУН ТААНУУ МАСЕЛЕСИНДЕ БИНАРДЫК МАТРИЦАЛАРДАГЫ ЭТАЛОНДУК КЛАССИФИКАТОР

Бийбосунов Б. И., Халмуратов Б. О.
И. Арабаев атындагы Кыргыз мамлекеттик университети

Кыргыз алфавитинин кол жазма символдорун таануу маселеси каралат; анын өзгөчөлүгү Ө, Ң жана Ү тамгалары менен аныкталат, алар жазылышы жагынан жакын О, Н жана У тамгаларынан кичинекей жергиликтүү элемент менен гана айырмаланат. Белгиленген өлчөмдөгү бинардык матрицаларда иштеген эталондук классификатор формалдаштырылган. Бинардык векторлор үчүн эң аз евклиддик норма боюнча чечим эрежеси Хэмминг аралыгынын минимуму боюнча эреже менен дал келери көрсөтүлгөн; бул арифметиканы биттик операциялар менен алмаштырууга жана бир эталон менен салыштыруунун эмгек сыйымдуулугун бир нече машина сөзүнө чейин төмөндөтүүгө мүмкүндүк берет. Жазылышы жакын жуптарды туруктуу ажыратуу шарты киргизилип, айырмалоочу элементтин аянты тордун чечилиши боюнча функция катары бааланган. Эсептөө көрсөткөндөй, 10×10 тордо «О — Ө» жубунун ажыратылыш запасы аз, ал эми алгылыктуу катыш 28×28 тордон баштап жетишилет. Символ боюнча чечим чогултулган сөздү сөздүк боюнча текшерүү менен тактала турган эки каскаддуу схема жана Python, Django, PostgreSQL негизиндеги веб-прототиптин архитектурасы сүрөттөлгөн. Иш методикалык мүнөзгө ээ: методдун формалдык баяндамасы, татаалдык жана ажыратылыш баалоолору, ошондой эле алынган баалоолорду сандык текшерүү үчүн зарыл болгон өлчөө экспериментинин программасы келтирилет.

Баштапкы сөздөр: образдарды таануу, кол жазма текст, кыргыз алфавити, эталондук метод, Хэмминг аралыгы, бинардык белгилер, эсептөө татаалдыгы.

A TEMPLATE CLASSIFIER ON BINARY MATRICES FOR HANDWRITTEN CHARACTER RECOGNITION OF THE KYRGYZ ALPHABET

Biibosunov B. I., Khalmuratov B. O.
Kyrgyz State University named after I. Arabaev

The paper addresses handwritten character recognition for the Kyrgyz alphabet, whose specific difficulty is caused by three letters — Ө, Ң and Ү — that differ from the graphically close О, Н and У only by a small local element. A template classifier operating on binary matrices of fixed size is formalised. It is shown that for binary vectors the decision rule based on the minimum Euclidean norm coincides with the rule based on the minimum Hamming distance, which allows arithmetic to be replaced by bitwise operations and reduces the cost of a single template comparison to a few machine words. A condition of stable discriminability for graphically close pairs is introduced, and a model estimate of the area of the distinguishing element is obtained as a function of grid resolution. The calculation shows that on a 10×10 grid the discriminability margin of the pair О — Ө is small, while an acceptable ratio is reached starting from a 28×28 grid. A two-stage scheme is described in which the per-character decision is refined by a dictionary check of the assembled

word, together with the architecture of a web prototype based on Python, Django and PostgreSQL. The work is methodological: it provides a formal description of the method, complexity and discriminability estimates, and a programme of the measurement experiment required to verify these estimates quantitatively.

Keywords: pattern recognition, handwritten text, Kyrgyz alphabet, template method, Hamming distance, binary features, computational complexity.

Введение

Автоматическое чтение рукописного текста остаётся одной из немногих задач распознавания образов, где переход к цифровым документам всё ещё упирается в ручной ввод. В Кыргызской Республике эта задача имеет дополнительную сторону: массово доступные системы оптического распознавания настроены на латиницу и на русскую кириллицу, тогда как кыргызский алфавит содержит три буквы, отсутствующие в русском, — Ө, Ң и Ү. Все три образованы добавлением малого элемента к уже существующей букве: перекладина внутри овала О даёт Ө, хвостик у правой стойки Н даёт Ң, петля в основании У даёт Ү. Для системы, обученной на русской кириллице, такой элемент оказывается ниже порога значимости, и Ө читается как О, Ң — как Н.

Классические подходы к распознаванию образов подробно изложены в работах [1—5]. Развитие признаковых описаний привело к дескрипторам, устойчивым к сдвигу и освещённости, — гистограммам направленных градиентов [6] и локальным бинарным шаблонам [7]. Свёрточные сети [8] сегодня дают наилучшие результаты на массовых наборах рукописных символов, а практика их применения к документам сложилась ещё в начале двухтысячных [9]. Для кириллицы существует размеченный набор Cyrillic-MNIST [10], однако он покрывает русский алфавит и не содержит кыргызских букв.

У нейросетевого пути есть цена: он требует размеченной выборки достаточного объёма, вычислительных ресурсов для обучения и не даёт простого объяснения отдельного решения. Для учебных и вспомогательных задач, где алфавит невелик, а вычислительные ресурсы ограничены, сохраняет смысл эталонный метод — прямое сравнение изображения символа с набором заранее сохранённых образцов. Его достоинства известны: отсутствие этапа обучения, прозрачность решения и возможность пополнять базу эталонов, не переобучая модель [2, 3].

Цель настоящей работы — дать формальное описание эталонного классификатора на бинарных матрицах применительно к кыргызскому

алфавиту, оценить его вычислительную трудоёмкость и, главное, установить, при каком разрешении растровой сетки малый различающий элемент букв Ө, Ң и Ү остаётся устойчиво различимым. Последний вопрос в литературе по эталонным методам обычно не ставится, между тем именно он определяет применимость подхода к кыргызскому письму.

Формальная постановка

Пусть изображение символа приведено к квадратной растровой сетке k × k и бинаризовано. Результат представляется вектором $x \in \{0, 1\}^n$, где $n = k^2$, а единица соответствует закрашенной клетке. База эталонов содержит M образцов $e_1, \ldots, e_m$, каждый из которых снабжён меткой класса $c(e_i) \in \{1, \ldots, K\}$, где K — мощность алфавита. Один класс представлен несколькими эталонами, отражающими варианты начертания.

Решающее правило состоит в выборе эталона, ближайшего к предъявленному вектору в смысле евклидовой нормы разности:

$$\hat{c}(x) = c(e_j),\ j = \arg\min_i \|x - e_i\|_2,\ i = 1, \ldots, M. \qquad (1)$$

Правило (1) не требует обучения: настройка классификатора сводится к наполнению базы эталонов. Именно это свойство делает его удобным для алфавита, который дополняется новыми начертаниями по мере накопления образцов почерка.

Эквивалентность евклидовой и хэмминговой метрик

Для бинарных векторов правило (1) допускает существенное упрощение. Поскольку каждая координата принимает лишь значения 0 и 1, разность $x_i - e_i$ принимает значения −1, 0 или 1, и её квадрат равен модулю:

$$\|x - e\|_2^2 = \sum_i (x_i - e_i)^2 = \sum_i |x_i - e_i| = d_h(x, e). \qquad (2)$$

Правая часть (2) есть расстояние Хэмминга, то есть число несовпадающих разрядов. Поскольку квадратный корень — монотонно возрастающая функция, порядок эталонов по евклидовой норме и по расстоянию Хэмминга совпадает, а значит правило (1) эквивалентно правилу

$$j = \arg\min_i d_h(x, e_i). \qquad (3)$$

Практическое следствие состоит в том, что вычисление корней и умножений не требуется вовсе. Расстояние Хэмминга между двумя битовыми строками равно числу единиц в их поразрядной сумме по модулю два, то есть вычисляется как популяционный счёт результата операции «исключающее ИЛИ» [11]. Современные процессоры выполняют такой счёт одной инструкцией над машинным словом, поэтому сравнение с одним эталоном сводится к $[n / w]$ парам операций,

где w — разрядность слова. Соответствующие оценки приведены в таблице 1.

Таблица 1. — Трудоёмкость сравнения с одним эталоном при разной сетке (w = 64)

Сетка k × k	Размерность n	Операций при поэлементном сравнении	Машинных слов при битовом представлении
10 × 10	100	100	2
16 × 16	256	256	4
20 × 20	400	400	7
28 × 28	784	784	13

Полный перебор базы требует M сравнений, то есть трудоёмкость распознавания одного символа составляет O(M·⌈n / w⌉) операций и линейно растёт с объёмом базы. Это и есть главное ограничение эталонного подхода: точность повышается наполнением базы, а цена решения растёт вместе с ней. Для алфавита из K классов при равномерном представлении классов M = K·r, где r — число вариантов начертания на класс, и трудоёмкость линейна по r.

Предел различимости близких по начертанию пар

Специфика кыргызского алфавита ставит перед эталонным методом вопрос, который для русской кириллицы не возникает. Буквы каждой из пар О — Ө, Н — Ң, У — Ү совпадают почти полностью и различаются только малым элементом. Обозначим через S число клеток сетки, занимаемых этим элементом. Тогда для идеально написанных образцов расстояние между эталонами пары равно $d_h = S$.

Реальный почерк отклоняется от эталона: линия смещается, толщина штриха меняется, овал вытягивается. Обозначим через δ типичное число клеток, меняющих своё значение из-за такой вариативности. Символ будет устойчиво отнесён к своему классу, а не к парному, если различающий элемент вносит в расстояние больший вклад, чем случайное отклонение почерка:

$$S > 2\delta. \qquad (4)$$

Множитель два учитывает, что отклонение действует в обе стороны — приближая образец к чужому эталону и одновременно удаляя от своего. Условие (4) даёт прямой критерий выбора разрешения сетки.

Оценим обе величины как функции k. Примем, что символ занимает по ширине около 0,6k клеток, а толщина штриха составляет max(1; 0,06k) клеток. Перекладина буквы Ө пересекает овал по ширине, поэтому её

площадь S ≈ 0,6k · max(1; 0,06k). Вариативность δ пропорциональна длине контура: при смещении линии на одну клетку меняется число клеток порядка длины контура, которая для овала О составляет около π · 0,6k. Результаты расчёта сведены в таблицу 2.

Таблица 2 — Модельная оценка различимости пары «О — Ѳ» при разной сетке

Сетка k × k	**Длина перекладины, клеток**	**Толщина штриха, клеток**	**Площадь элемента S, клеток**	**Длина контура овала, клеток**	**Отношение S к длине контура**
10 × 10	6,0	1,0	6	19	0,32
16 × 16	9,6	1,0	10	30	0,32
20 × 20	12,0	1,2	14	38	0,38
28 × 28	16,8	1,7	28	53	0,53

Расчёт показывает, что до сетки 16 × 16 отношение площади различающего элемента к длине контура остаётся постоянным: и элемент, и вариативность растут линейно по k, поэтому увеличение разрешения само по себе преимущества не даёт. Положение меняется, когда толщина штриха начинает превышать одну клетку: с этого момента площадь перекладины растёт квадратично, а длина контура — по-прежнему линейно, и отношение улучшается. При сетке 28 × 28 оно составляет 0,53 против 0,32 при сетке 10 × 10, то есть запас различимости возрастает более чем в полтора раза.

Отсюда следуют два вывода. Первый: сетка 10 × 10, привлекательная своей вычислительной дешевизной, для пар О — Ѳ, Н — Ң и У — Ү находится вблизи границы применимости, и ошибки на этих парах ожидаемо составят основную долю всех ошибок. Второй: если увеличивать разрешение нежелательно, условие (4) можно выполнить иначе — дополнив бинарный вектор несколькими целевыми признаками, отвечающими именно за наличие различающего элемента, например признаком пересечения внутренней области овала горизонтальным штрихом. Такой признак вносит в расстояние постоянный вклад независимо от разрешения и потому эффективнее наращивания сетки.

Словарная постобработка

Посимвольное решение по правилу (3) не использует того, что символы образуют слово. Второй каскад схемы устраняет этот пробел. Последовательность распознанных символов сопоставляется со словарём целевого языка; если слово найдено, оно принимается, если нет — рассматриваются варианты, полученные заменой символов на ближайшие по расстоянию Хэмминга альтернативы из правила (3).

Именно на парах О — Ө, Н — Ң и У — Ү словарная проверка даёт наибольший выигрыш, поскольку эти пары почти никогда не порождают двух осмысленных слов одновременно: замена Ө на О в кыргызском слове, как правило, приводит к несуществующей словоформе. Тем самым второй каскад компенсирует ровно ту слабость первого, которая выявлена условием (4). Ограничение схемы очевидно: она применима к словам, входящим в словарь, и бесполезна для имён собственных и числовых последовательностей.

Архитектура прототипа

Изложенный метод реализован в виде веб-приложения. Серверная часть построена на языке Python с использованием каркаса Django, база эталонов размещена в системе управления базами данных PostgreSQL. Клиентская часть содержит область рисования на элементе canvas, куда пользователь вводит символ или слово указателем, и кнопку запуска распознавания. Введённое изображение приводится к бинарной матрице, разделяется на отдельные символы и передаётся на сервер, где выполняется правило (3) и словарная проверка. Результат возвращается с цветовой индикацией: найденное в словаре слово выделяется одним цветом, не найденное — другим, что даёт пользователю немедленный сигнал о вероятной ошибке распознавания.

Хранение эталонов в реляционной базе, а не в файлах, выбрано из соображений пополняемости: добавление нового варианта начертания сводится к вставке записи и не требует перестроения системы. Это же свойство позволяет накапливать образцы почерка в ходе эксплуатации и постепенно наращивать r — число вариантов на класс.

Обсуждение и программа измерений

Полученные результаты носят аналитический характер. Соотношение (2) доказано и верно для любых бинарных векторов; оценки трудоёмкости в таблице 1 следуют из него непосредственно. Оценки в таблице 2 являются модельными: они опираются на принятые пропорции символа и толщины штриха и указывают порядок величины и характер зависимости, но не заменяют измерения на реальных образцах почерка.

Никаких экспериментальных значений точности распознавания в настоящей работе не приводится, и утверждать превосходство описанной схемы над существующими системами на основании изложенного нельзя.

Для количественной проверки предлагается следующая программа. Формируется размеченный набор образцов всех K классов кыргызского алфавита, собранный не менее чем от тридцати пишущих, с фиксацией числа образцов на класс и разделением на обучающую и контрольную части без пересечения по пишущим. На этом наборе измеряются: доля правильных ответов в целом и по классам; матрица ошибок с выделением подматрицы пар О — Ө, Н — Ң, У — Ү; зависимость доли ошибок от разрешения сетки k при $k \in \{10, 16, 20, 28\}$, что позволит проверить расчёт таблицы 2; зависимость доли ошибок и времени распознавания от числа эталонов на класс r; прирост доли правильных ответов, вносимый словарным каскадом. В качестве базы сравнения целесообразно взять общедоступную систему оптического распознавания и компактную свёрточную сеть, обученную на том же наборе.

Заключение

Формализован эталонный классификатор на бинарных матрицах для распознавания рукописных символов кыргызского алфавита. Показано, что на бинарных векторах решающее правило по минимуму евклидовой нормы тождественно правилу по минимуму расстояния Хэмминга, вследствие чего сравнение с эталоном выполняется побитовыми операциями и требует $\lceil n / w \rceil$ машинных слов вместо n арифметических действий; при сетке 10 × 10 и разрядности 64 это два слова на эталон.

Введено условие устойчивой различимости близких по начертанию пар, связывающее площадь различающего элемента с вариативностью почерка. Модельный расчёт показал, что при сетках до 16 × 16 увеличение разрешения не улучшает различимость пары О — Ө, поскольку обе величины растут линейно, а выигрыш появляется лишь тогда, когда толщина штриха превышает одну клетку сетки. Отсюда получен практический вывод: для кыргызского алфавита разумнее не наращивать разрешение, а дополнить описание целевыми признаками наличия различающего элемента.

Дальнейшая работа состоит в проведении описанного измерительного эксперимента, построении набора образцов кыргызского рукописного письма, отсутствующего сегодня в открытом доступе, и в сопоставлении эталонной схемы с компактной свёрточной сетью по точности, времени отклика и требованиям к вычислительным ресурсам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёв, Ю. И. Распознавание. Классификация. Прогноз. Математические методы и их применение / Ю. И. Журавлёв.– Москва: Наука, 1999. – Вып. 2.
2. Фисенко, В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебное пособие / В.Т.Фисенко. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2018. – 192 с.
3. Фу, К. С. Лингвистический подход к распознаванию образов / К. С. Фу. – Москва : Мир, 2010.
4. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning [Text] / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
5. Duda, R. O. Pattern Classification [Text] / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – 2nd ed. – New York: Wiley, 2001.
6. Dalal, N. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection [Text] / N. Dalal, B. Triggs // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 1. – P. 886–893.
7. Ojala, T. Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns [Text] / T. Ojala, M. Pietikäinen, T.Mäenpää// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – Vol. 24, No. 7. – P. 971–987.
8. LeCun, Y. Deep learning [Text] / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521, No. 7553. – P. 436–444.
9. Simard, P. Y. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis [Text] / P. Y. Simard, D. Steinkraus, J. C. Platt // Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition. – 2003. – Vol. 3. – P. 958–962.
10. Cyrillic-MNIST: a Cyrillic Version of the MNIST Dataset [Text] / B. Tleubayev, A. Khassanov, R. Mussabayev [et al.] // Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference. – Marseille: European Language Resources Association, 2022.
11. Warren, H. S. Hacker’s Delight [Text] / H. S. Warren. – 2nd ed. – Boston: Addison-Wesley, 2012. – 512 p.

УДК 622.44

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «ДЖЕРУЙ»

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР
[2]Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

В статье рассмотрены вопросы обоснования выбора рационального способа проветривания подземных горных выработок рудника «Джеруй». Проведен анализ горно-геологических, горнотехнических и производственных условий эксплуатации месторождения, оказывающих влияние на организацию вентиляции рудника. Выполнена сравнительная оценка существующих способов и схем проветривания с учетом требований промышленной безопасности, обеспечения нормативного воздухообмена и перспектив развития горных работ.

***Ключевые слова*:** проветривание горных выработок, вентиляционная сеть, нагнетательный способ проветривания, вентиляторы местного проветривания, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление, распределение воздушных потоков, рудничная атмосфера.

“ЖЕРҮЙ” КЕНИНИН ШАРТЫНДА ТОО-КАЗЫЛМАЛАРЫН ЖЕЛДЕТҮҮНҮН РАЦИОНАЛДУУ ЫКМАСЫН ТАНДОО

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Механика, автоматика жана геомеханика институту,
[2]И.Раззакова атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Макалада “Жерүй” кениндеги жер астындагы жумуштарды жүргүзүүдө рационалдуу желдетүү ыкмасын тандоонун негиздери каралат. Кендин вентиляциялык системасына таасирин тийгизген кенди иштетүүнүн геологиялык, техникалык жана өндүрүштүк шарттарына талдоо берилген. Өнөр жай коопсуздугунун талаптарын, туура аба алмашууну камсыз кылууну жана тоо-кен өндүрүшүн өнүктүрүүнүн келечегин эске алуу менен желдетүүнүн колдонуудагы ыкмаларына жана схемаларына салыштырмалуу баа берилет.

***Баштапкы сөздөр*:** шахталарды желдетүү, вентиляция тармагы, аргасыз желдетүү ыкмасы, жергиликтүү желдеткичтер, аба агымы, аэродинамикалык каршылык, аба агымынын бөлүштүрүлүшү, шахта атмосферасы.

RATIONALE FOR THE CHOICE OF A RATIONAL METHOD OF VENTILATION OF MINING WORKINGS IN THE CONDITIONS OF THE "JEROOY" MINE

Isagalieva[1] S.U., Meimanbek[2] k. A.
[1]Institute of Mechanical Science, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
[2]Kyrgyz State Technical University named after. I. Razzakov

The article examines the issues of justifying the choice of a rational method for ventilation of underground mine workings of the Jerooy mine. An analysis of the mining, geological, mining and production conditions of the deposit operation that affect the organization of mine ventilation was carried out. A comparative assessment of existing ventilation methods and schemes was carried out taking into account industrial safety requirements, ensuring standard air exchange and prospects for the development of mining operations.

***Keywords*:** ventilation of mine workings, ventilation network, forced ventilation method, local ventilation fans, air flow, aerodynamic resistance, air flow distribution, mine atmosphere.

Значение проветривания горных выработок для рудника

Месторождение «Джеруй» расположено в Таласской области Кыргызстана и является одним из крупнейших золоторудных месторождений страны. Оно находится примерно в 70 км от города Талас и относится ко второму по значимости золотому объекту в стране.

Разработка месторождения осуществляется современными горными предприятиями, а производственная мощность предприятия достигает около 5 тонн золота в год.

Геологические и горнотехнические условия месторождения характеризуются:

- горным рельефом местности;
- сложным геологическим строением рудных тел;
- возможностью ведения комбинированной разработки (открытой и подземной);
- наличием глубоких горизонтов подземных выработок.

Эти условия требуют эффективной системы проветривания горных выработок, обеспечивающей безопасность работников и нормальные условия ведения горных работ.

Проветривание горных выработок представляет собой систему мероприятий по подаче свежего воздуха в подземные выработки и удалению загрязнённого воздуха.

Основные задачи проветривания:

1. обеспечение рабочих свежим воздухом;
2. удаление вредных газов и пыли;
3. снижение температуры и влажности воздуха;
4. удаление газов после буровзрывных работ;
5. предотвращение образования опасных концентраций вредных веществ.

При отсутствии эффективной вентиляции возможно накопление пыли и газов, образующихся при бурении, взрывных работах и транспортировке руды.

Способы проветривания горных выработок

Проветривание горных выработок организуют двумя основными способами: общешахтным и местным. Общешахтная вентиляция обеспечивает воздухообмен во всей сети выработок благодаря работе главных вентиляторных установок, размещенных на поверхности. Местное проветривание применяется преимущественно в тупиковых забоях, где используют вентиляторы местного проветривания (ВМП) совместно с вентиляционными трубами.

При организации общешахтной вентиляции используют несколько схем. Наиболее распространенной считается всасывающая схема, при которой вентилятор удаляет загрязненный воздух, создавая в шахте разрежение. Нагнетательная схема основана на принудительной подаче свежего воздуха внутрь выработок. Кроме того, на практике применяется комбинированный вариант, объединяющий особенности обеих систем.

Для тупиковых выработок, куда поток воздуха из общей вентиляционной сети поступает недостаточно эффективно, используют специальные методы местного проветривания. При нагнетательном способе свежий воздух подается вентилятором по трубопроводу непосредственно к забою, что способствует снижению концентрации вредных газов, однако загрязненный воздух при этом перемещается вдоль всей выработки. Всасывающий способ предполагает удаление газов от забоя через жесткий трубопровод, благодаря чему большая часть выработки остается относительно чистой, но для предотвращения

образования застойных зон требуется более мощное оборудование. В условиях протяженных тупиковых выработок нередко применяют комбинированную систему, сочетающую подачу и отсос воздуха одновременно.

Для распределения воздушных потоков и предотвращения смешивания свежего и исходящего воздуха в шахтах используют специальные вентиляционные сооружения: перемычки, шлюзы и кроссинги. Скорость движения воздуха контролируют в установленных пределах, поскольку чрезмерная скорость повышает запыленность, а недостаточная может привести к накоплению метана и других опасных газов.

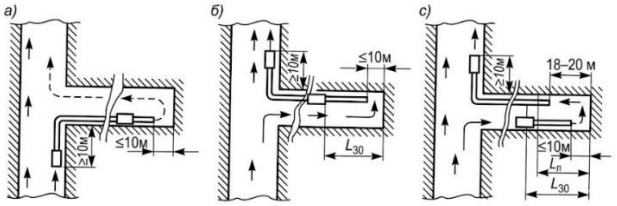


Рис.1. Способ проветривания тупиковых выработок: нагнетательный (а), всасывающий (б) и комбинированный (в).

Анализ способов проветривания и обоснование выбора схемы проветривания рудника.

Проветривание подземных горных выработок рудника «Джеруй» предусматривается осуществлять по нагнетательной схеме с организацией центральной системы проветривания.

Главная вентиляционная установка (ГВУ) располагается в районе штольни горизонта +3160 м и оснащается осевыми вентиляторами типа ВО-32АР-750 об/мин (или аналогичными по техническим характеристикам), при этом предусматривается схема «1 рабочий – 1 резервный агрегат», что обеспечивает необходимый уровень надежности вентиляционной системы и бесперебойную подачу воздуха в подземные выработки.

Реверсирование воздушного потока осуществляется путем изменения направления вращения ротора вентиляторов, что позволяет обеспечить подачу не менее 60% расчетного расхода воздуха по главным выработкам в обратном направлении при аварийных или регламентных режимах проветривания.

В условиях отрицательных температур наружного воздуха подогрев поступающего в подземные выработки воздуха осуществляется с применением воздухонагревательной установки (ВНУ), размещенной в

наземном здании вблизи штольни горизонта +3160 м и работающей в автоматическом режиме регулирования параметров воздушной среды.

Обоснование выбора нагнетательной схемы проветривания.

Выбор нагнетательной схемы проветривания для условий рудника «Джеруй» обусловлен горно-геологическими и горнотехническими особенностями месторождения, включая значительную глубину горных работ, сложную конфигурацию выработок и необходимость стабильного распределения воздушных потоков по протяжённой вентиляционной сети.

К основным преимуществам нагнетательной схемы относятся:

- обеспечение поступления свежего воздуха непосредственно в основные рабочие зоны;
- более равномерное распределение воздушного потока по сети выработок;
- снижение риска подсоса загрязнённого воздуха из отработанных участков;
- улучшенные условия контроля и регулирования параметров вентиляции;
- высокая эффективность при развитой и разветвлённой системе подземных выработок.

К недостаткам нагнетательной схемы следует отнести:

- необходимость повышенного давления вентилятора и, как следствие, увеличенные энергетические затраты;
- возможное образование зон повышенного давления в сети выработок;
- более жесткие требования к герметичности вентиляционных сооружений;
- усложнение работы при аварийных режимах по сравнению с некоторыми всасывающими схемами.

Несмотря на указанные ограничения, нагнетательная центральная схема проветривания является наиболее рациональной для условий рудника «Джеруй», так как обеспечивает требуемую производительность, устойчивость воздушного режима и соответствие требованиям промышленной безопасности при развитии глубоких горизонтов и увеличении объемов подземных горных работ.

Нормативное обеспечение и параметры вентиляции рудника в увязке с принятой схемой проветривания

Проектирование и эксплуатация системы проветривания подземных горных выработок рудника «Джеруй» выполняются в соответствии с перечнем нормативных документов, обеспечивающих соблюдение

требований технического регламента Кыргызской Республики «Безопасность зданий и сооружений», утвержденного Приказом Центра стандартизации и метрологии при Министерстве экономики и антимонопольной политики Кыргызской Республики от 09.04.2012 г. №32.

В состав нормативной базы входят, в частности:

- «Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом» Кыргызской Республики;
- «Временная инструкция по расчету воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт»;
- «Нормы технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки» (ВНТП 37-86).

Данные нормативные документы регламентируют требования к минимальным расходам воздуха, кратности проветривания, допустимым концентрациям вредных газов, а также к выбору рациональных схем вентиляции, что непосредственно подтверждает целесообразность применения нагнетательной центральной схемы проветривания, обоснованной ранее.

Расчетные параметры воздухообмена по этапам отработки.

Потребность в свежем воздухе для рудника изменяется в зависимости от этапов разработки месторождения:

Первый этап отработки (2025–2032 гг.):

2026 год — Q = 213,5 м³/с;

2032 год — Q = 301,5 м³/с.

Второй этап отработки (2033–2038 гг.):

2033 год — Q = 312,5 м³/с;

2038 год — Q = 312,5 м³/с.

Увеличение расхода воздуха на втором этапе связано с ростом протяженности горных выработок, увеличением числа очистных и проходческих забоев, а также ростом аэродинамического сопротивления вентиляционной сети.

Организация движения воздушных потоков.

Свежая воздушная струя подается в шахту через штольню горизонта +3160 м с использованием главной вентиляторной установки. Далее распределение воздуха по рабочим горизонтам осуществляется через автотранспортный уклон и вентиляционные восстающие, что обеспечивает эффективное поступление воздуха в зоны ведения горных работ.

Исходящая воздушная струя из очистных и проходческих забоев удаляется через вентиляционно-ходовые восстающие, расположенные на флангах шахтного поля. Далее загрязненный воздух выводится на поверхность через штольни горизонтов +3320 м, +3240 м и +3080 м.

Проветривание тупиковых забоев осуществляется нагнетательным способом с применением вентиляторов местного проветривания (ВМП) типового ряда ВМЭ по гибким вентиляционным ставам, что обеспечивает локальное поддержание нормативных параметров рудничной атмосферы.

Для предотвращения короткого замыкания вентиляционной струи и обеспечения рационального распределения воздуха по выработкам предусматривается установка вентиляционных дверей, перемычек и вентиляционных парусов. Незадействованные выработки изолируются глухими вентиляционными перемычками.

Режим работы главной вентиляторной установки.

По результатам математического моделирования воздухораспределения вентиляционной сети установлены следующие параметры работы главной вентиляторной установки:

Первый этап отработки:

2026 год: Q = 213,5 м³/с, депрессия H = 2415 Па, КПД = 0,80;

2032 год: Q = 301,5 м³/с, депрессия H = 3457 Па, КПД = 0,87.

Второй этап отработки:

2033 год: Q = 312,5 м³/с, депрессия H = 3631 Па, КПД = 0,85;

2038 год: Q = 312,5 м³/с, депрессия H = 4323 Па, КПД = 0,85.

Увеличение депрессии вентиляционной системы на втором этапе связано с ростом аэродинамического сопротивления сети вследствие увеличения длины горных выработок и усложнения схемы воздухораспределения.

Принятая нагнетательная центральная схема проветривания обеспечивает нормативные параметры воздухообмена, устойчивость вентиляционного режима и соответствует требованиям действующих нормативных документов, что подтверждает её рациональность для условий рудника «Джеруй».

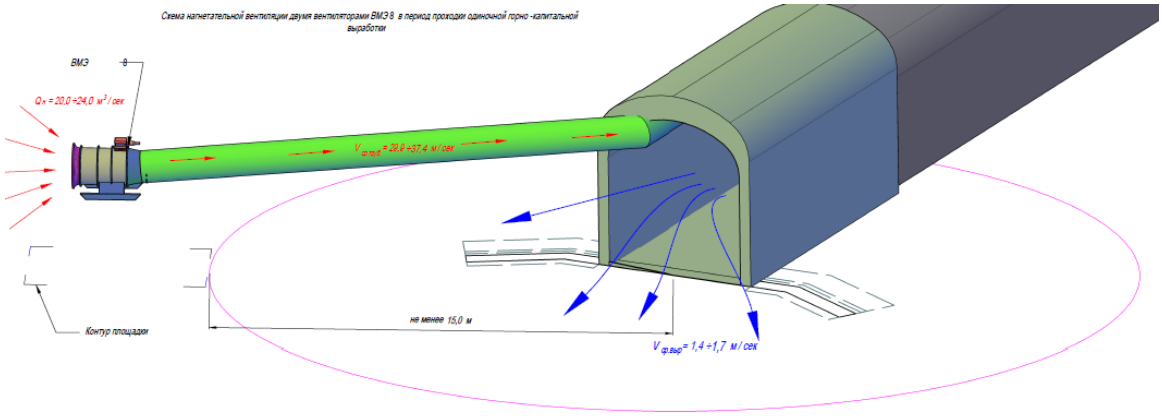


Рис.2. Нагнетательная схема проветривания рудника.

Расчёт требуемого количества воздуха для проветривания подземного участка

Расчёт требуемого количества воздуха для проветривания подземного участка, производится по следующим факторам:

- по количеству одновременно работающих людей;
- по пылевому фактору;
- по газу, при взрывных работах;
- по выхлопным газам, при использовании самоходного оборудования;
- по минимальной скорости движения воздуха.

Для подачи в забой принимается наибольшее количество воздуха, полученное при расчетах по различным факторам.

Проходческие работы:

- Расчет воздуха по количеству одновременно работающих людей, определяется по формуле:

$$Q_л = Z \cdot q/60,\ м^3/с,$$

где:

Z – наибольшее количество людей в забое;

q = 6 м³/мин – норма подачи свежего воздуха на одного человека

–горизонтальный забой $Q_л = 3 \cdot 6/60 = 0,3$ м³/с.

–вертикальный забой $Q_л = 2 \cdot 6/60 = 0,2$ м³/с.

Расчет воздуха по пылевому фактору, определяется по формуле:

$$Q = \frac{J \cdot b_1}{n - n_{вх}},м^3/с$$

где:

J – интенсивность пылевыделения, мг/с;

b_1- коэффициент, учитывающий снижение пылевыделения при применении средств гидрообеспыливания;

n – ПДК по пыли на рабочих местах, мг/м^3;

$n_{вх}$ – запыленность во входящей струе, принимается: в очистной и проходческий забой $n_{вх}$ = 0,3 мг/м^3.

Таблица 1

Наименование производственного процесса при очистной добыче	Интенсивность пылевыделения (J), мг/с	Коэффициент снижения пылевыделения ($в_1$)	ПДК по пыли (n), мг/м³	Расчетное количество воздуха по пыли (Qп), м³/с
При бурении шпуров (при проходке горизонтальных и наклонных выработок)	6	0,5	2	1,8
При бурении шпуров (при проходке вертикальных выработок)	9,7	0,5	2	2,9
При погрузке или доставке руды ПДМ с ковшом	6,8	0,2	2	0,8
При разгрузке руды ПДМ с ковшом	13	0,2	2	1,6

Расчет воздуха по газу, при взрывных работах, определяется по формуле:

–при проходке горизонтальных горно-капитальных выработок:

$$Q_З = \frac{2{,}25}{t}\sqrt[3]{\frac{A \cdot в \cdot S^2 \cdot L^2 \cdot K_{об}}{К^2_{ут.тр}}} = \frac{2{,}25}{1800}\sqrt[3]{\frac{126{,}9 \cdot 100 \cdot 14^2 \cdot 500^2 \cdot 0{,}8}{1{,}3}} = 9{,}1 м^3/с$$

где:

A – масса одновременно взрываемого ВВ равняется 126,9 кг;

в - газоводность данного типа ВВ =100, л/кг;

S – поперечное сечение 15,0 м2;

L – длина тупиковой части выработки, 500 м;

$К_{об}$ - коэффициент обводненности принимаем 0,8;

$К_{ут.тр.}$ - коэффициент утечек воздуха в трубопроводе при длине 500 метров равен 1,3;

t – время проветривания 30 мин (1800 сек).

– при проходке горизонтальных горно-подготовительных выработок:

$$Q_з = \frac{2{,}25}{t}\sqrt[з]{\frac{A \cdot в \cdot S^2 \cdot L^2 \cdot K_{об}}{К^2_{ут.тр}}} = \frac{2{,}25}{1800}\sqrt[з]{\frac{114{,}4 \cdot 100 \cdot 12{,}1^2 \cdot 300^2 \cdot 0{,}8}{1{,}19}}$$

$$= 5,,8\ м^3/с$$

–при проходке вертикальных горных выработок:

$$Q_{вв} = \frac{3{,}35 \cdot К_1 \cdot К_2}{t}\sqrt{\frac{A \cdot в \cdot S}{K_{ут.тр}}} = \frac{3{,}35 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}0}{1800}\sqrt{\frac{37{,}2 \cdot 100 \cdot 80 \cdot 6}{1{,}07}} = 1{,}7\ м^3/с$$

- Расчет воздуха по выхлопным газам, при использовании самоходного оборудования, определяется по формуле:

$$Q_{в.п} = \frac{N \cdot q}{60} = \frac{232 \cdot 5}{60} = 19.3\ м^3/с$$

N – мощность двигателя, ПДМ фирмы «Epirok» типа «ST3.5» = 232 л.с;

q – норма подачи свежего воздуха на 1 л.с. мощности двигателя =5 м³;

- Расчет воздуха по минимальной скорости движения воздуха, определяется по формуле:

$$Q_{оч} = V_{min} \cdot S, м^3/с$$

- Горно-капитальных горизонтальных выработок $Q_{оч}$ = 0,25·14,0 = 3,5,м³/с
- Подготовительно-нарезных горизонтальных выработок $Q_{оч}$=0,25·12,1= 3,0, м³/с
- Вертикальные выработки $Q_{оч}$ = 0,25 · 6,0 = 1,5, м³/с

<u>Очистные работы</u>

Расчет воздуха по количеству одновременно работающих людей

Qл = Z·q/60=5·6/60=0,5, м³/с,

Расчет воздуха по пылевому фактору

Таблица 2

Наименование производственного процесса при очистной добыче	Интенсивность пылевыделения (J), мг/с	Коэффициент снижения пылевыделения ($в_1$)	ПДК по пыли (n), мг/м³	Расчетное количество воздуха по пыли (Qп), м³/с
При бурении взрывных скважин буровым станком типа Simba K102	12,7	0,5	2	3,7

При погрузке или доставке руды ПДМ с ковшом	6,8	0,2	2	0,8
При разгрузке руды ПДМ с ковшом	13	0,8	2	6,1

Расчет воздуха по газу, при взрывных работах, определяется по формуле:

– При системах разработки с обрушением:

$$Q_{\text{вв}} = \frac{3{,}4}{t}\sqrt{A \cdot \text{в} \cdot V_{\text{зо}}} = \frac{3{,}4}{1800}\sqrt{912 \cdot 100 \cdot 214} = 8{,}3\ \text{м}^3/\text{с}$$

Расчет воздуха по выхлопным газам:

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{N \cdot q}{60} = \frac{232 \cdot 5}{60} = 19.3\ \text{м}^3/\text{с}$$

- Расчет воздуха по минимальной скорости движения воздуха

– При буровых работах $Q_{\text{оч}}$ = 0,5 · 10,7 = 5,4, м³/с

– При очистных работах $Q_{\text{оч}}$ = 0,25 · 10,7 = 2,7, м³/с

Проветривание технологических камер обособленной струей воздуха

- Проветривание склада ВВ до 4 тонн на отметке +3080 метра

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{K \cdot V}{60} = \frac{1500 \cdot 0{,}07}{60} = 1{,}8\ \text{м}^3/\text{с}$$

где:

Vк - суммарный объем камерной выработки =1500, м³;

К – коэффициент, учитывающий кратность обмена воздуха в течение часа, принимается: К=0,07 для складов ВМ.

Проветривание пункта обслуживания самоходного оборудования на отметке +3160 метра

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{K \cdot V}{60} = \frac{2200 \cdot 0{,}33}{60} = 12{,}1\ \text{м}^3/\text{с}$$

где:

Vк - суммарный объем камерной выработки = 2200, м³;

К – коэффициент, учитывающий кратность обмена воздуха в течение часа, принимается: К=0,33 для складов ДСО.

Проветривание вспомогательного оборудования с дизельным двигателем участвующих больше 10 минут в течение 2 часов.

Транспортировка горной массы автосамосвалами:

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{N \cdot q}{60} = \frac{325 \cdot 5}{60} = 27{,}1\ \text{м}^3/\text{с}$$

N – мощность двигателя, автосамосвала фирмы «Epirok» типа «МТ2200» = 325 л.с;

q – норма подачи свежего воздуха на 1 л.с. мощности двигателя =5 м³;

$$Q_{\text{в.п}} = \frac{N \cdot q}{60} = \frac{232 \cdot 5}{60} = 19.3 \text{ м}^3/\text{с}$$

N – мощность двигателя, ПДМ фирмы «Epirok» типа «ST3.5» = 232 л.с;

q – норма подачи свежего воздуха на 1 л.с. мощности двигателя =5 м³;

Проветривание поддерживаемых выработок на отметки +3240

$$Q_{оч} = V_{min} \cdot S = 0{,}15 \cdot 7 = 1{,}1, \text{м}^3/\text{с}$$

Проветривание очистного блока в резерве

$$Q_{оч} = V_{min} \cdot S = 0{,}25 \cdot 12{,}1 = 3{,}0 \text{ м}^3/\text{с}$$

Выбор вентилятора местного проветривания (ВМП)

Выбор вентилятора производится по расчетным значениям его производительности Qв и депрессии hв.

Производительность ВМП, работающего на нагнетание, рассчитывается по формуле:

$$Q_{н.в} = К \cdot Q \text{ , м}^3 / \text{с}$$

$Q_з$ – наибольшее значение количества воздуха, полученного при расчетах по различным факторам;

$К_{ут.тр}$ – коэффициент утечек воздуха через трубопровод на всю его длину.

Депрессия вентилятора рассчитывается по формуле:

$$h = 10{,}8 \cdot Q^2 \cdot R \cdot \psi, \text{Па}$$

10,8 – коэффициент, учитывающий запас депрессии на преодоление сопротивления шумогасителя;

$Q_в$ – производительность вентилятора, м³/с; R – сопротивление трубопровода, кμ; ψ- коэффициент, учитывающий влияние утечек на депрессию трубопровода, ψ=0,94η+0,06; η- коэффициент доставки η=1/$К_{ут.тр}$.;

Удаление горной массы из тупикового забоя протяженностью 300 метров

• Производительность ВМП

$$Q_{\text{н.в}} = K_{\text{ут.тр}} \cdot Q = 19{,}3 \cdot 1{,}19 = 23{,}0 \text{ м}^3 / \text{с}$$

• Депрессия вентилятора:

Диаметр гибкого трубопровода приминается равным 800 мм.

$$\eta = 1/1{,}19 = 0{,}84$$

$$\psi = 0{,}94 \cdot 0{,}84 + 0{,}06 = 0{,}8496;$$

$$h = 10,8 \cdot Q^2 \cdot R \cdot \psi = 10,8 \cdot 23,0^2 \cdot 3,1 \cdot 0,8496 = 15047, \text{Па}$$

Так как депрессия $h_в$=15047 Па для одного воздуховода, производится расчет для двух воздуховодов.

$$h = 10,8 \cdot Q^2 \cdot R \cdot \psi = 10,8 \cdot 11,5^2 \cdot 3,1 \cdot 0,8496 = 3762, \text{Па}$$

Буровые работы в забое протяжённостью 300 метров

• Производительность ВМП

$$Q_{н.в} = К_{ут.тр} \cdot Q = 9,1 \cdot 1,19 = 10,8, \text{м}^3/\text{с}$$

• Депрессия вентилятора:

Диаметр гибкого трубопровода приминается равным 800 мм.

$$\eta = 1/1,19 = 0,84$$

$$\psi = 0,94 \cdot 0,84 + 0,06 = 0,8496;$$

$$h = 10,8 \cdot Q^2 \cdot R \cdot \psi = 10,8 \cdot 10,8^2 \cdot 3,1 \cdot 0,8496 = 3318, \text{Па}$$

Вентиляция тупиковых выработок осуществляется по двум гибким ставам диаметром 800 мм.

По вентиляционной характеристике сети и аэродинамической характеристике принимаются два последовательно установленных вентилятора местного проветривания типа «ВМЭ-8» на каждом ставе. Характеристика вентилятора представлена в таблице 3.

Таблица 3. Характеристика вентилятора ВМЭ-8

№ п/п	Характеристика	Значение
1.	Диапазон статического давления, Па	500-4000
2.	Диапазон подачи воздуха, м3/с	4-14
3.	Мощность электропривода, кВт	45
4.	Масса комплекта вентилятора, кг, не более	640
Габариты ВМЭ-8:	Длина, м	1,23
	Ширина, м	0,9
	Высота, м	1,17

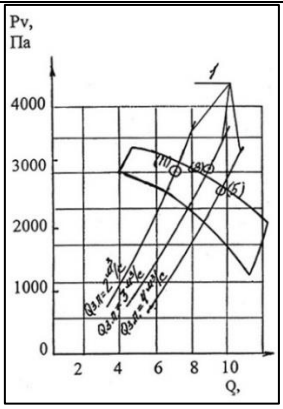


Рис.3. Аэродинамическая характеристика вентилятора ВМЭ-8.

Заключение. Выбор центральной нагнетательной схемы общешахтного проветривания для условий рудника «Джеруй» обусловлен совокупностью специфических горно-геологических, горнотехнических и климатических факторов, характерных для высокогорного расположения месторождения. При расположении устьев штолен на абсолютных отметках более 3000–3160 м над уровнем моря ключевое влияние на работу вентиляционной системы оказывают пониженное атмосферное давление, низкие температуры наружного воздуха и сложный орографический рельеф.

Применение нагнетательного способа проветривания обеспечивает возможность эффективной подачи предварительно подогретого воздуха с использованием воздухонагревательной установки (ВНУ), размещенной на входе главной вентиляционной системы у штольни горизонта +3160 м. Формирование устойчивого избыточного давления в вентиляционной сети способствует равномерному распределению воздушных потоков по горным выработкам и повышает надежность вентиляционного режима.

Кроме того, нагнетательная схема позволяет предотвратить обмерзание устьев штолен, транспортных уклонов и сопряжений, а также снижает вероятность неконтролируемых подсосов холодного воздуха через трещиноватые зоны и фланговые участки массива, что особенно актуально для условий сложного горного рельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технический проект разработки месторождения Джеруй» ООО «СПб ГИПРОШАХТ», 2016.
2. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом Кыргызской Республики. – Бишкек, 2012.
3. Временная инструкция по расчету воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт (ВНТП 37-86). – М., 1986.
4. Нормы технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки (ВНТП 37-86). – М., 1986.
5. Боровков В. А. Вентиляция шахт и рудников. – М.: Недра, 2005.
6. Куликов В. А. Проектирование вентиляции подземных горных выработок. – М.: Горная книга, 2012.
7. Технический регламент Кыргызской Республики «Безопасность зданий и сооружений». – Бишкек, 2012.

УДК 556:004.8

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Сабитов[1] Б.Р., Шейшенов[1] Ж., Мусалиева[2] С.К., Матраимов[2] С.К.
[1]КНУ им. Баласагына, [2]КГТУ им. М. Раззакова

В данной работе с инструментами машинного обучения построено регрессионная модель классификации и прогнозирования качества воды. В исследованиях водной среды модели и выводы, полученные с помощью машинного обучения, применяется для построения, мониторинга, моделирования, оценки и оптимизации различных систем очистки и управления водными ресурсами. Кроме того, машинное обучение может предоставлять решения для контроля загрязнения воды, улучшения качества воды и управления безопасностью экосистем водосборов.

Ключевые слова: машинное обучение, прогнозирование, загрязнение воды, качество воды.

МАШИНА ЖАНА ТЕРЕҢ ОКУТУУГА НЕГИЗДЕЛГЕН СУУ РЕСУРСТАРЫНЫН МАСЕЛЕЛЕРИН ОПТИМАЛДАШТЫРУУ ЖАНА МОДЕЛДӨӨ

Сабитов[1] Б.Р., Шейшенов[1] Ж., Мусалиева[2] С.К., Матраимов[2] С.К.
Баласагын атындагы [1]КМУ, И.Раззаков атындагы [2]КМТУ

Бул макалада машиналык окутуу куралдарын колдонуу менен суунун сапатын классификациялоо жана алдын ала айтуу үчүн регрессиялык модель курулган. Суу изилдөөлөрүндө машиналык окутууну колдонуу менен алынган моделдер жана тыянактар ар кандай сууну тазалоо жана башкаруу системаларын долбоорлоо, көзөмөлдөө, моделдөө, баалоо жана оптималдаштыруу үчүн колдонулат. Андан тышкары, машиналык окутуу суу бассейндеринде суунун булганышын көзөмөлдөө, суунун сапатын жакшыртуу жана экосистеманын коопсуздугун башкаруу үчүн чечимдерди бере алат.

Баштапкы сөздөр: машиналык окутуу, божомолдоо, суунун булганышы, суунун сапаты.

OPTIMIZATION AND MODELING OF WATER RESOURCE PROBLEMS BASED ON MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING

Sabitov[1] B.R., Sheishenov[1] Zh., Musalieva[2] S.K., Matraimov[2] S.K.
[1]J. Balasagyn Kyrgyz National University,
[2]I. Razzakov Kyrgyz State Technical University

This article presents a regression model for water quality classification and forecasting developed using machine learning tools. In aquatic environment research, models and insights derived from machine learning are applied to the design, monitoring, modeling, assessment, and optimization of various water treatment and resource management systems. Furthermore, machine learning can provide solutions for controlling water pollution, improving water quality, and managing the safety of watershed ecosystems.
Keywords: machine learning, forecasting, water pollution, water quality.

Введение. Создано модель для определения качества воды -WQI с применением нейронного моделирования DenseNet. На базе обученной модели построено веб система на фреймворке FLASK для определения пригодности питья воды. В данной работе с инструментами машинного обучения построено регрессионная модель классификации и прогнозирования качества воды. В отличие от традиционных моделей, используемых в исследованиях, связанных с водными ресурсами, модели на основе данных, основанные на моделях, и могут эффективно решать более сложные нелинейные задачи о водных проблемах. В исследованиях водной среды модели и выводы, полученные с помощью машинного обучения, применяется для построения, мониторинга, моделирования, оценки и оптимизации различных систем очистки и управления водными ресурсами. Кроме того, машинное обучение может предоставлять решения для контроля загрязнения воды, улучшения качества воды и управления безопасностью экосистем водосборов. В этом обзоре мы описываем случаи, в которых алгоритмы машинного обучения применялись для оценки качества воды в различных водных средах, таких как поверхностные воды, грунтовые воды, питьевая вода, сточные воды и морская вода.

Разработаны различные модели по контролю загрязнения воды. Исследовано сточные воды содержащие различные загрязняющие вещества, что представляет серьезную угрозу для естественной водной среды. Важно в данном случае анализ и оценка моделей качества воды, которые могут существенно повысить эффективность определения и контроля уровень загрязнения воды [1]. На сегодняшний день

разработано много методов для мониторинга и оценки качества воды во всем мире, таких как многомерный статистический метод [2], нечеткий вывод [3] и индекс качества воды (WQI) [4]. Что касается оценки качества воды, хотя большинство параметров качества воды можно контролировать в соответствии с процедурами, определенными в соответствующих стандартах, окончательные результаты оценки качества воды могут сильно различаться из-за выбора параметров [5]. Учет всех параметров качества воды нереалистичен, поскольку это не только дорого и технически сложно, но и не учитывает изменчивость качества воды [6]. Однако в последние годы, благодаря достижениям в методах машинного обучения, все больше исследователей полагают, что можно успешно собирать и анализировать огромные объемы данных для удовлетворения сложных и масштабных требований к оценке качества воды.

В машинном обучении, отрасли искусственного интеллекта, алгоритмы используются для анализа данных и попытки извлечь потенциальные закономерности из данных для прогнозирования новой информации [7, 8]. Как новый метод анализа и обработки данных, машинное обучение широко используется во многих областях благодаря своей высокой точности, гибкой настройке и удобной расширяемости [9]. Сложные нелинейные реляционные данные могут быть легко обработаны с помощью машинного обучения, что облегчает обнаружение базовых механизмов [10]. Отличная адаптивность машинного обучения продемонстрировала его потенциал как инструмента в областях экологической науки и техники в последние годы. Поэтому можно ожидать более точных результатов оценки, несмотря на сложность использования машинного обучения для анализа и оценки качества воды [11].

Типы воды, включая питьевую воду, сточные воды, грунтовые воды, поверхностные воды, морскую воду и пресную воду, являются сложными [12]. Эти различные типы воды имеют разные характеристики, что приводит к значительным проблемам при исследовании их качества. Основываясь на результатах предыдущих исследований, машинное обучение может быть эффективным подходом к решению этих проблем. Поэтому в этом обзоре мы суммируем преимущества и недостатки широко используемых алгоритмов машинного обучения и обсуждаем применение и производительность машинного обучения в поверхностных водах, грунтовых водах, питьевой воде, сточных водах и морской воде Кроме того, мы предлагаем возможные будущие применения подходов машинного обучения к водным средам.

Методы исследования и результаты. В настоящее время мощным методом анализа данных о водной среде является инструменты машинного обучения, широко используемые для выявления закономерностей или составления прогнозов на основе больших данных. Для разработки моделей машинного обучения на практике необходимо провести сбор данных, выбор подходящего алгоритма, обучение модели и ее валидацию. Среди этих процессов выбор алгоритма имеет решающее значение. Обучение с учителем и без учителя — это два основных класса технологий машинного обучения [13].

Основное различие между этими двумя классами заключается в наличии меток в наборах данных. Обучение с учителем выводит предиктивные функции из помеченных обучающих наборов данных. Каждый обучающий экземпляр включает входные значения и ожидаемые выходные значения. Алгоритмы обучения с учителем пытаются определить взаимосвязи между входными и выходными значениями и создать предиктивную модель для прогнозирования результата на основе соответствующих входных данных. Контролируемое обучение может использоваться для классификации и регрессии данных, при этом были разработаны различные алгоритмы, включая линейную регрессию, искусственную нейронную сеть (ИНС), дерево решений (ДР), машину опорных векторов (SVM), наивный байесовский алгоритм, метод k-ближайших соседей (KNN), случайный лес (RF) и т. д.

В отличие от этого, обучение без учителя обычно используется для обработки данных без меток, решая различные задачи распознавания образов на основе немаркированных обучающих наборов данных. Обучение без учителя классифицирует обучающие данные по различным категориям в соответствии с их различными характеристиками, в основном на основе снижения размерности и кластеризации [14]. Однако количество категорий неопределено, и значение каждой категории неясно. Поэтому обучение без учителя обычно используется для классификации и поиска ассоциаций [13]. Анализ главных компонент (PCA), метод k-средних и т. д. являются наиболее часто используемыми алгоритмами машинного обучения без учителя.

Загрузка и предварительная обработка данных: анализ данных, обработка пропущенных значений, нормализация. Создание модели DenseNet: адаптация архитектуры DenseNet для табличных данных.

Обучение двух моделей: с оптимизаторами Adam и RMSprop. Визуализация: Кривые обучения (accuracy, loss, precision, recall) Матрицы ошибок ROC и AUC кривыеPrecision-Recall кривыеСравнительный

анализ: Сравнение метрик accuracy и AUC Анализ переобучения Рекомендации по выбору модели. Интерпретация результатов: Подробный анализ производительности обеих моделей.

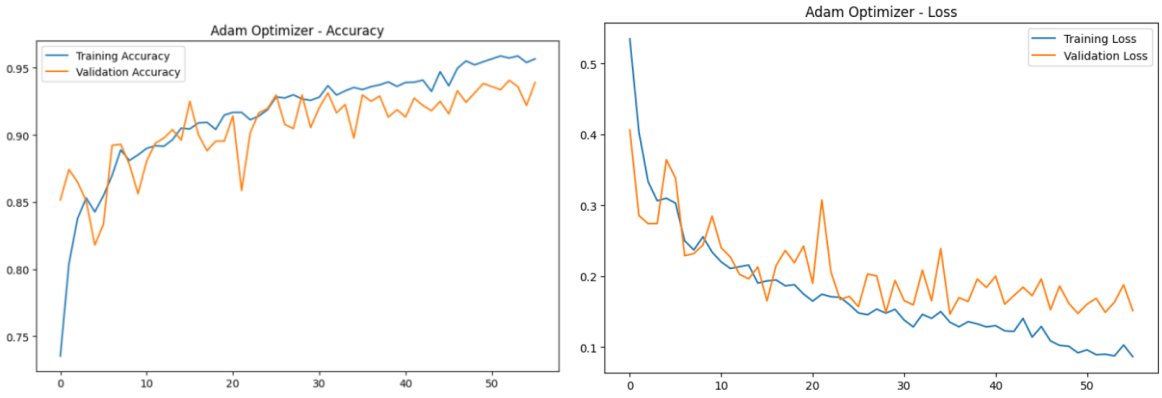
Ключевые особенности реализации: Использование transfer learning с DenseNet архитектурой. Балансировка классов для работы с несбалансированными данными Early stopping и reduce learning rate для улучшения сходимости. Полный набор метрик для комплексной оценки моделей.

Приведено также детальная визуализация результатов. Для получения наилучших результатов рекомендуется настроить гиперпараметры (learning rate, количество слоев, dropout rate) в зависимости от конкретных характеристик вашего набора данных. База данных для реализации использует следующую .csv файл. Признаки данного файла состоит из металлов и записано в виде файла

Построим нейронную сеть на основе открытой базы данных Dataset_WQI.csv с признаками aluminium, ammonia, arsenic, barium, cadmium, chloramine, chromium, copper, flouride, bacteria, viruses, lead, nitrates, nitrites, mercury, perchlorate, radium, selenium, silver, uranium и с целевой функцией качества воды is_safe построим модель нейронной сети трансферного обучения DenseNet с оптимизаторами Adam и RMSProp.

Результатом реализации будет также построение кривых обучения и ошибки моделей, матрицы ошибок, ROC, AUC кривые и сравнительный анализ моделей в различных метриках.

Результаты и обсуждения. Создано модель на основе архитектуры нейронной сети DenseNet. Создан базовый входной слой. Добавлен собственные слои. Выходной слой и процесс компиляции модели. Одной из особенностью данной модели является использования разных оптимизаторов, оптимизатор Adam и RMSProp.В процесс реализации использовано 100 эпох с разными скоростями обучения. Вот результат обучения с разными скоростями обучения.



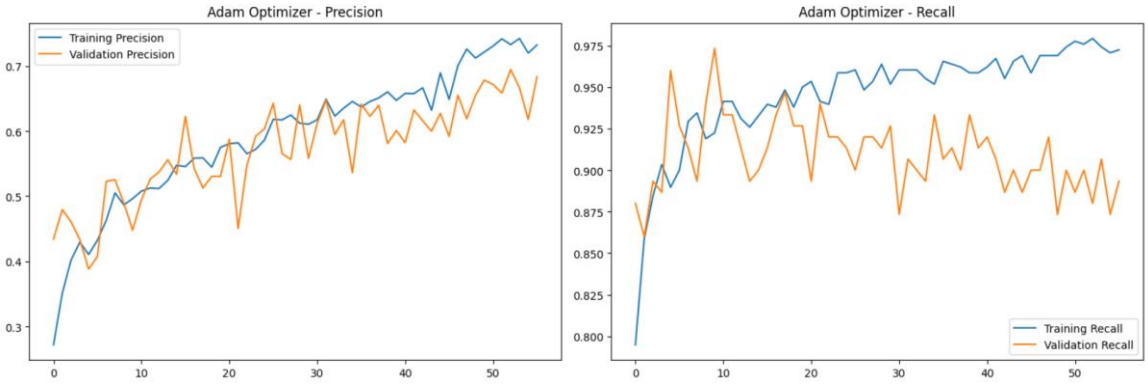


Рис.1. Результаты реализации модели прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора Adam.

Результаты с оптимизатором RMSProp

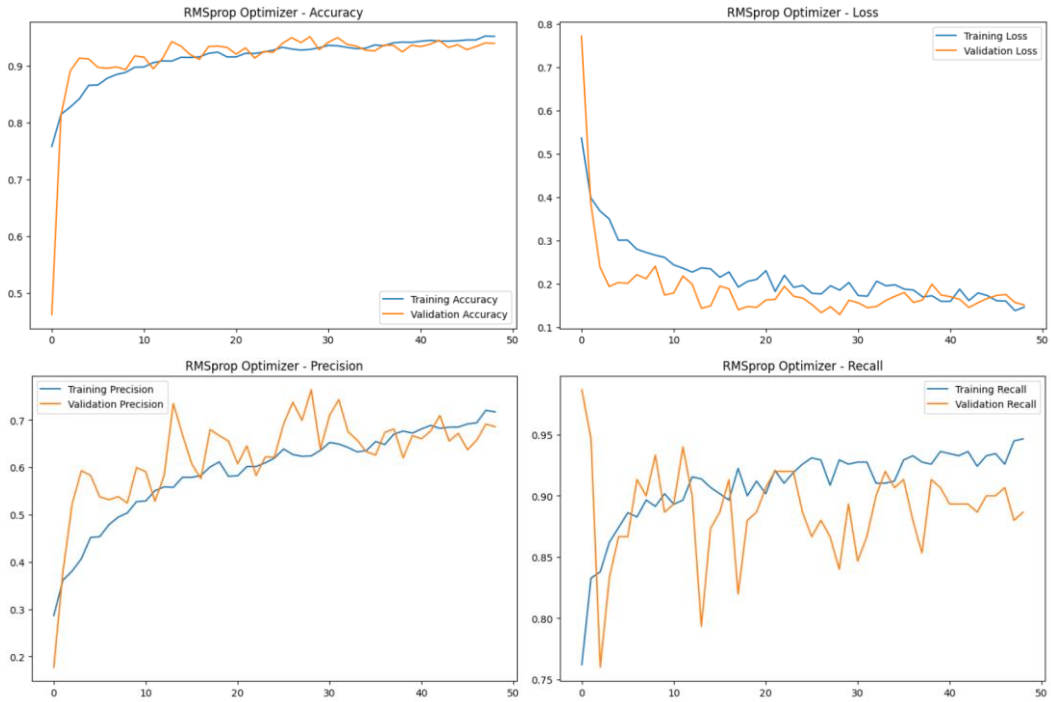


Рис.2. Результаты реализации модели прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора RMSProp.

Вот результаты прогноза с оптимизатором Адам

```
Adam Optimizer - Accuracy: 0.9363
Adam Optimizer - Classification Report:
              precision    recall  f1-score   support

         0.0       0.98      0.94      0.96      1418
         1.0       0.67      0.88      0.76       182

    accuracy                           0.94      1600
   macro avg       0.82      0.91      0.86      1600
weighted avg       0.95      0.94      0.94      1600
```

Рис.3. Результаты прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора Adam и RMSProp.

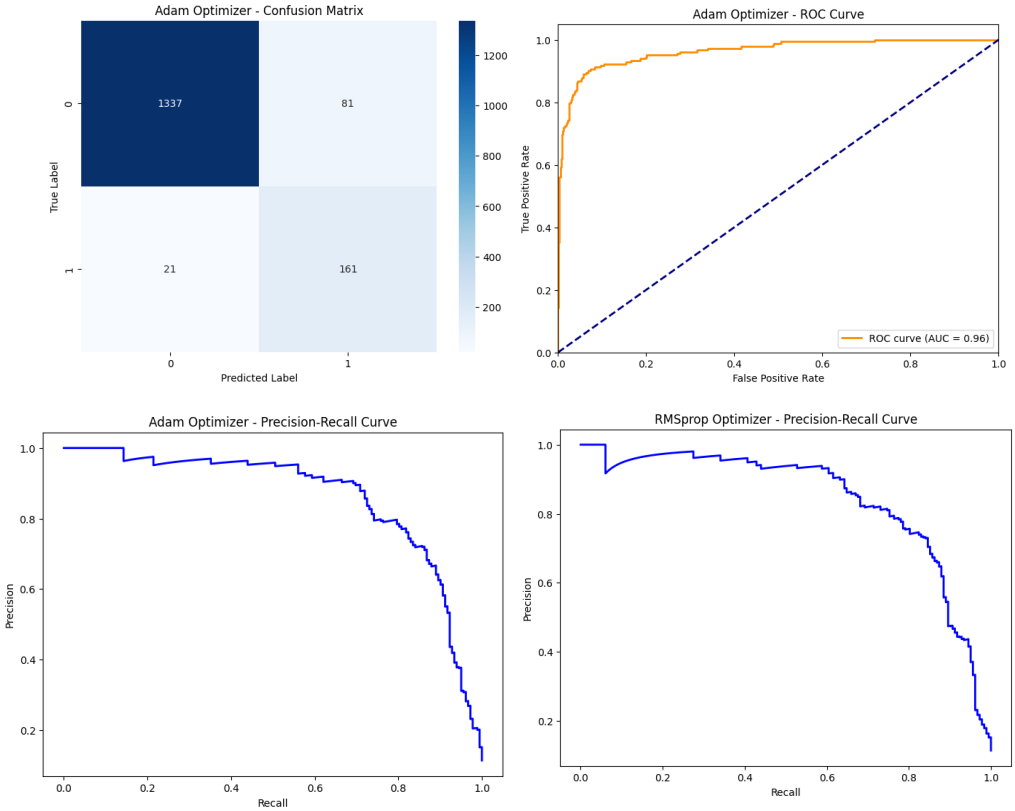


Рис.4. Матрица погрешностей Roc и Auc кривые прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора Adam и RMSProp. Улучшенные результаты прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора Adam и RMSProp.

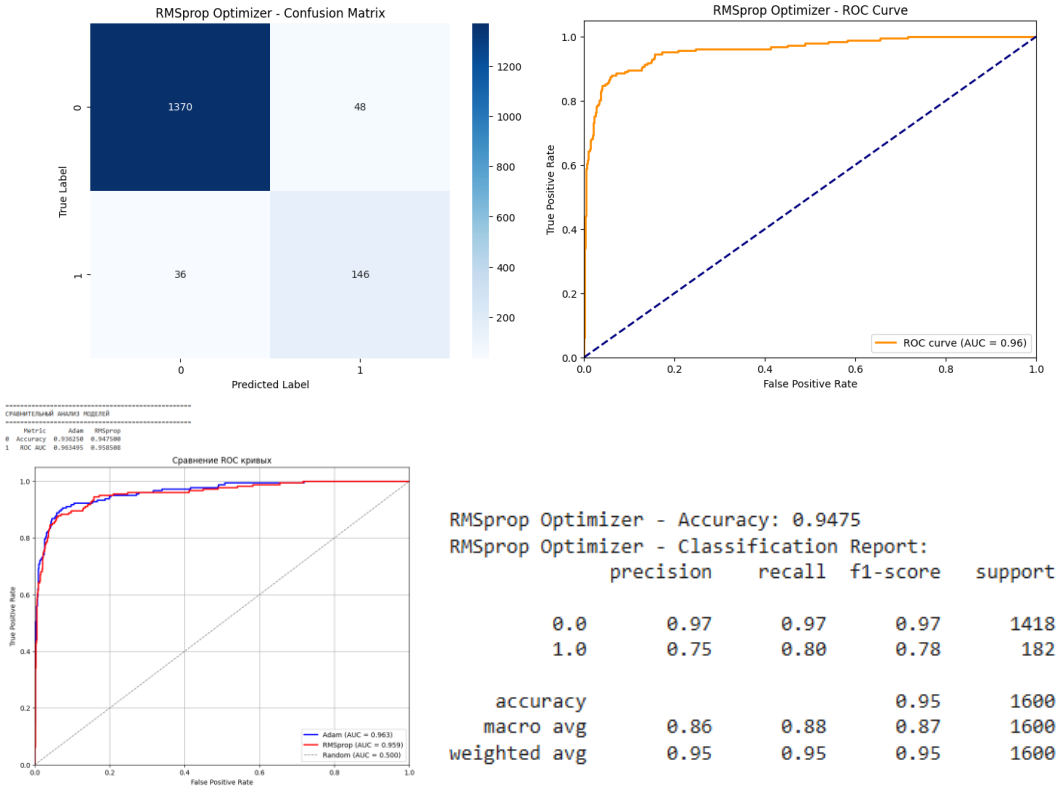


Рис. 5. Сравнительный анализ матрица погрешностей , Roc и Auc кривые прогнозирования качества воды с использованием оптимизатора Adam и RMSProp с различными скоростями обучения нейронной сети.

Листинг 1. Анализ процесса обучения нейронной сети по прогнозированию качества воды

```
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ:
Adam - Final Training Accuracy: 0.9566
Adam - Final Validation Accuracy: 0.9391
RMSprop - Final Training Accuracy: 0.9515
RMSprop - Final Validation Accuracy: 0.9391

==================================================
РЕКОМЕНДАЦИИ:
==================================================
✓ Модель с RMSprop оптимизатором показала лучшую точность
✓ Модель с Adam оптимизатором имеет лучшую AUC

Степень переобучения:
Adam: 0.0175
RMSprop: 0.0125
✓ Модель с RMSprop оптимизатором менее склонна к переобучению
```

В данной главе построено веб система для определения качества воды с применением моделей трансферного обучения. Построены модел DenseNET для прогнозирования пригодности питья воды. Архитектура модели для прогнозирования качества воды выглядит следующим образом. Пробный модель выглядит так.

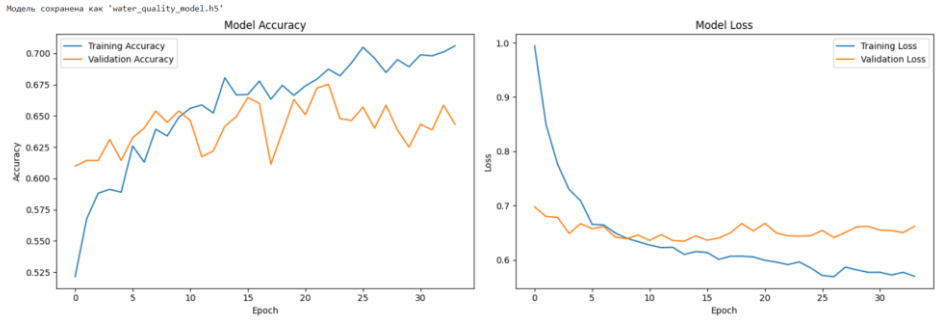


Рис. 6. Обучение модели о качестве воды на основе нейронной сети.

При реализации модели как веб система главная страница выглядит следущим образом для упрощенной модели.

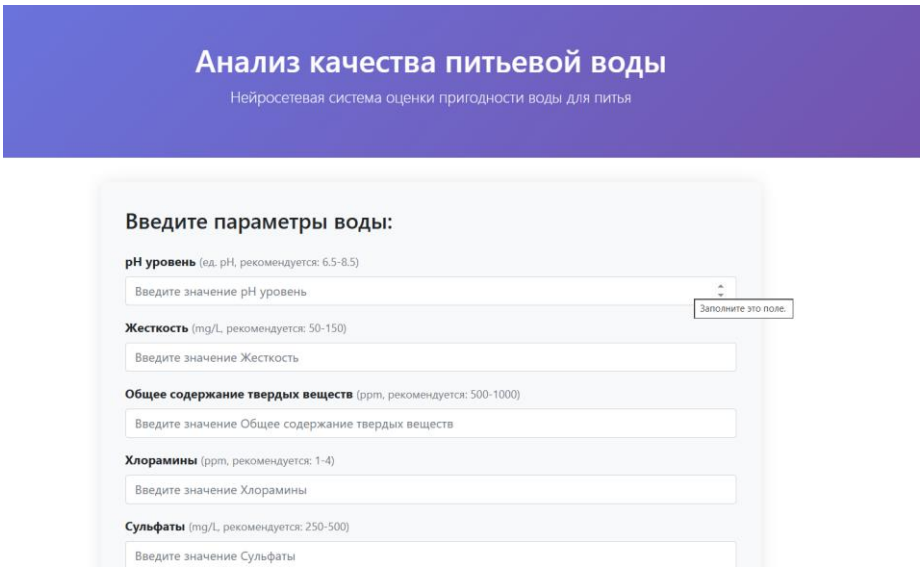
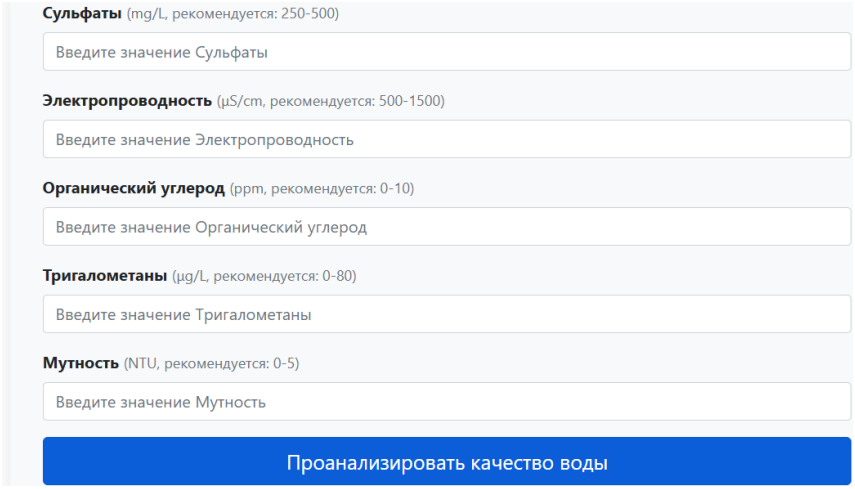


Рис. 7. Главная страница приложения

Технологии построения веб системы с базой знаний основывается на модели DenseNet и на фрейворке Flask. База данных представляет собой .csv файл параметры которой определяют качествао воды. Ниже представлены признаки и допустимый диапазон парметров входящие в модель.



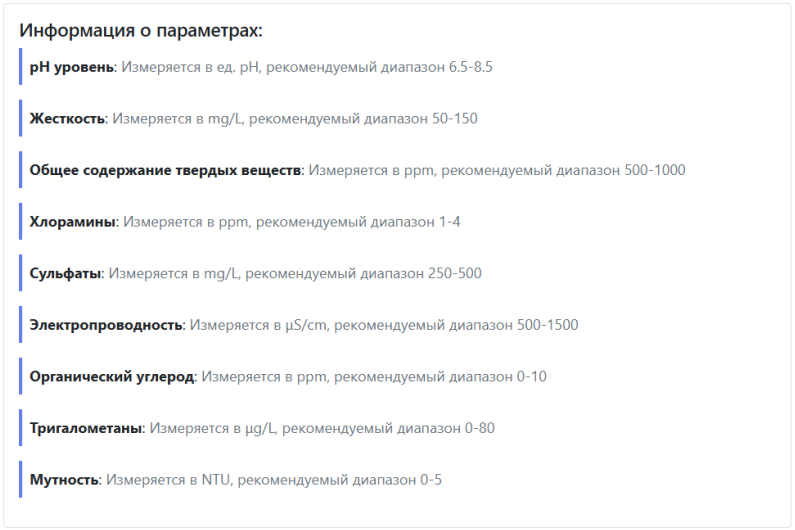


Рис. 8. Информация о параметрах.

Данная веб система имеет следующие особенности в реализациирелизации:

1. Модель DenseNet: используется архитектура, вдохновленная DenseNet, с плотными блоками и соединениями
2. Предобработка данных: Автоматическое заполнение пропущенных значений и масштабирование
3. Веб-интерфейс: Пользовательский интерфейс с Bootstrap
4. API endpoint: REST API для интеграции с другими системами
5. Анализ параметров: Детальный анализ каждого параметра воды
6. 6.Визуализация: Графики процесса обучения модели

Данную систему можно использовать для платформы фрейворков python и может быть развернута на любом хостинге, поддерживающем системы библиотек Python.Меню и главная страница модели с конечными результатами тестирования пригодности питья воды представлена в главной странице.

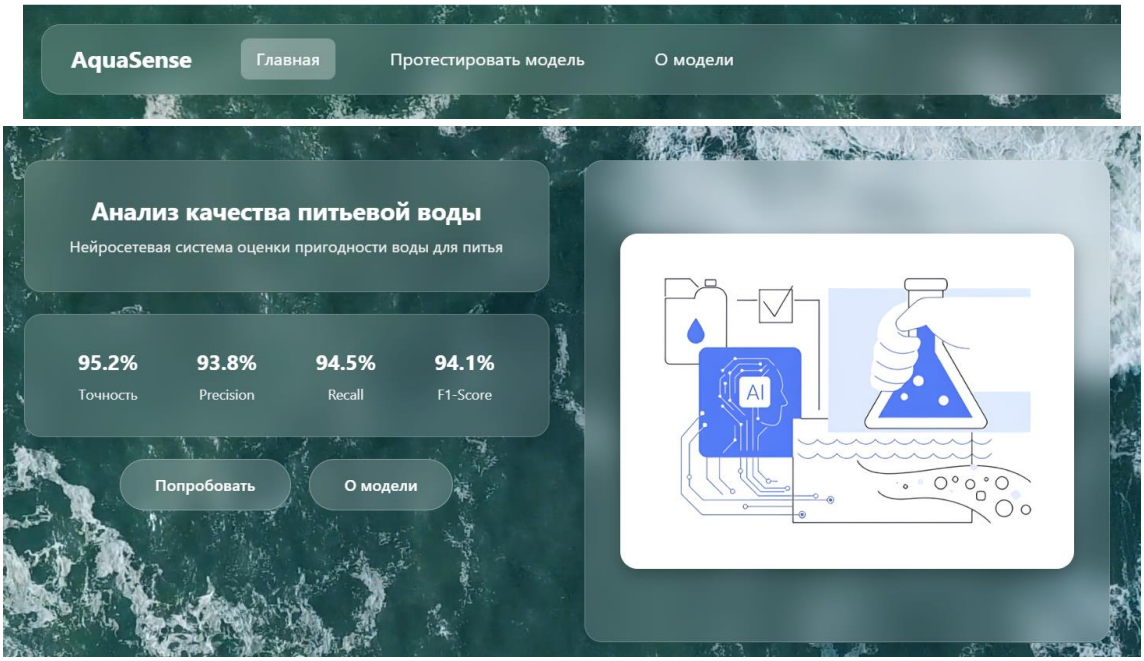


Рис.9. Главная страница

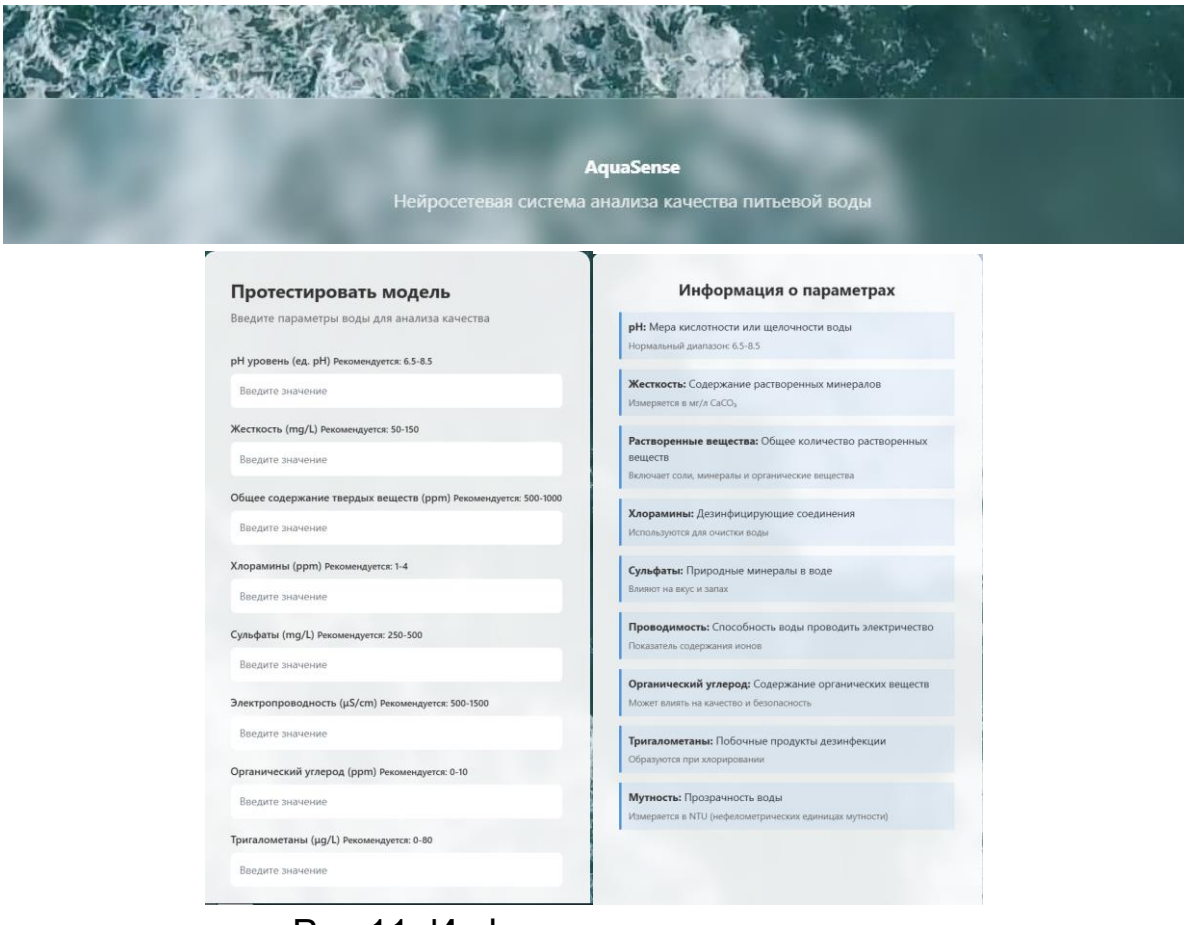


Рис 11. Информацияо параметрах

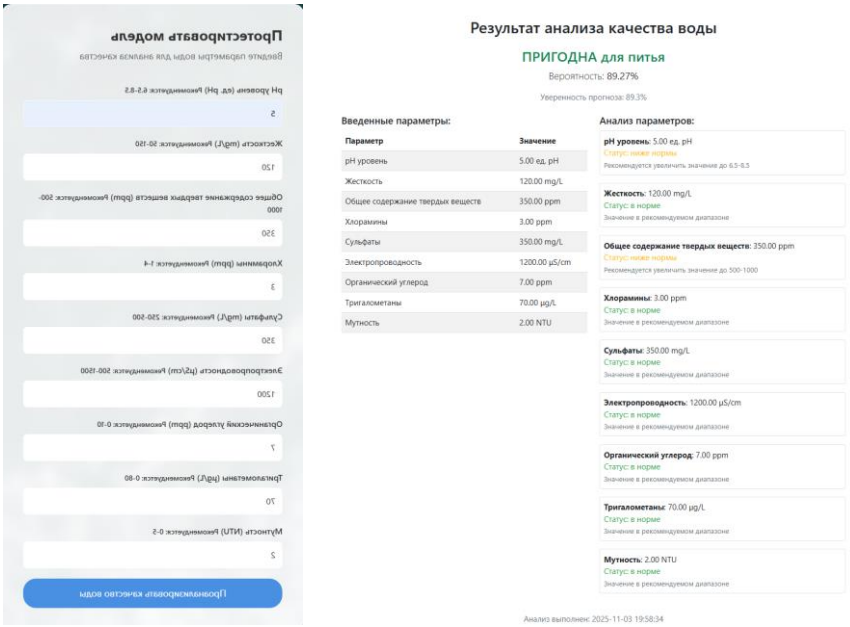


Рис 12. Результаты анализа



Рис 13. Информация о моделях



Рис. 14. О статистике обучения

Ниже представлен фрагмент кода данной веб-системы написанной на Python для Фреймворка Flask.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Pan, T. Leng, Y. Liu Shifosi reservoir water environmental assessment based on grey clustering Prog. Environ. Sci. Eng., 857 (2013), pp. 610-613 http://dio.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.857 View in ScopusGoogle Scholar
2. R. Alam, Z. Ahmed, S.M. Seefat, K.T.K. Nahin Assessment of surface water quality around a landfill using multivariate statistical method, Sylhet, Bangladesh,Environ. Nanotechnol. Monit. Manag., 15 (2021), Article 100422, 10.1016/j.enmm.2020.100422 View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar
3. J.O. Oladipo, A.S. Akinwumiju, O.S. Aboyeji, A.A. Adelodun Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: a case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria Environ. Chall., 3 (2021), Article 100038, 10.1016/j.envc.2021.100038 View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar
4. J. Wang, Z. Fu, H. Qiao, F. Liu Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China Sci. Total Environ., 650 (2019), pp. 1392-1402, 10.1016/j.scitotenv.2018.09.137 View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar
5. B. Wang, Y. Wang, S. Wang Improved water pollution index for determining spatiotemporal water quality dynamics: case study in the Erdao Songhua River Basin, China Ecol. Indicat., 129 (2021), Article 107931, 10.1016/j.ecolind.2021.107931 View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar
6. F.D. Simoes, A.B. Moreira, M.C. Bisinoti, S.M.N. Gimenez, M.J.S. Yabe
7. Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies Ecol. Indicat., 8 (2008), pp. 476-484, 10.1016/j.ecolind.2007.05.002 View PDFView articleView in ScopusGoogle Scholar

УДК 532.546

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ СКЛОНОВ КЫРГЫЗСТАНА

Орозобекова А.К., Батыркулова А.А.
КГТУ им. И. Раззакова

В данной статье рассматриваются разработка мобильного приложения «Kyrgyz Landslide Analytics” предназначенное для автоматизации расчетов коэффициента устойчивости склонов и оперативной оценки оползневой опасности на территории Кыргызской Республики. Для расчета коэффициента устойчивости склона рассмотрен метод круглоцилиндрической поверхности скольжения. Разработанная система обеспечивает выполнение инженерно-геологических расчетов непосредственно на мобильных устройствах, хранение данных, формирование отчетов и оценку уровня оползневой опасности.

Ключевые слова: оползни, мобильное приложение, физико-геологические свойства, устойчивость, базы данных, расчет, модель, карта.

КЫРГЫЗСТАНДАГЫ ТОО ЖАҢГАКТАРЫНЫН ТУРУКТУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨ ҮЧҮН МОБИЛДИК ТИРКЕМЕНИ ИШТЕП ЧЫГУУ

Орозобекова А.К., Батыркулова А.А.
И. Раззаков атындагы КМТУ

Бул макалада Кыргыз Республикасындагы жантайыңкы туруктуулук коэффициентин эсептөөнү автоматташтыруу жана жер көчкү коркунучун тез баалоо үчүн иштелип чыккан "Kyrgyz Landscape Analytics" мобилдик тиркемесин иштеп чыгуу талкууланат. Жантайыңкы туруктуулук коэффициентин эсептөө үчүн тегерек цилиндр формасындагы жылма бет ыкмасы колдонулат. Иштелип чыккан система мобилдик түзмөктөрдө түздөн-түз инженердик жана геологиялык эсептөөлөрдү жүргүзүүгө, маалыматтарды сактоого, отчетторду түзүүгө жана жер көчкү коркунучун баалоого мүмкүндүк берет.

Баштапкы сөздөр: жер көчкүлөр, мобилдик тиркеме, физикалык жана геологиялык касиеттер, туруктуулук, маалымат базалары, эсептөө, модель, карта.

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR CALCULATING THE STABILITY OF MOUNTAIN SLOPES IN KYRGYZSTAN

Orozobekova A.K., Batyrkulova A.A.
KSTU named after I. Razzakov

This article discusses the development of the "Kyrgyz Landslide Analytics" mobile application, designed to automate slope stability coefficient calculations and quickly assess landslide hazard in the Kyrgyz Republic. The circular cylindrical sliding surface method is used to calculate the slope stability coefficient. The developed system enables engineering and geological calculations directly on mobile devices, data storage, report generation, and landslide hazard assessment.

Keywords: landslides, mobile application, physical and geological properties, stability, databases, calculation, model, map.

Одним из важнейших направлений предупреждения чрезвычайных ситуаций является проведение инженерно-геологических исследований и оценка устойчивости склонов. Для решения данной задачи применяются различные методы геотехнического анализа, основанные на использовании математических моделей предельного равновесия грунтовых массивов. Результаты таких расчетов позволяют определить степень устойчивости склона и вероятность возникновения оползневого процесса.

Современное развитие мобильных технологий создает предпосылки для разработки специализированных программных средств, способных выполнять сложные инженерные расчеты непосредственно на мобильных устройствах. Использование смартфонов и планшетов позволяет осуществлять ввод исходных данных, выполнять вычисления, сохранять результаты исследований и формировать отчеты непосредственно на месте проведения работ. Это значительно повышает мобильность специалистов и сокращает время обработки информации.

В данной статье рассматриваются исследование методов оценки устойчивости оползневых склонов и разработка мобильного приложения “Kyrgyz Landscape Analytics” для автоматизированного расчета коэффициента устойчивости склонов на территории Кыргызской Республики.

Наибольшей катастрофичностью проявления среди других экзогенно-катастрофических процессов отличаются оползни, которые вызывают разрушения на больших территориях, приводят к огромным человеческим жертвам, причиняют большой ущерб экономике и

природной среде. Оползни имеют широкое распространение на всей территории Кыргызстана и, особенно, в южных регионах: Ошской, Джалал-Абадской и Баткенской областях.

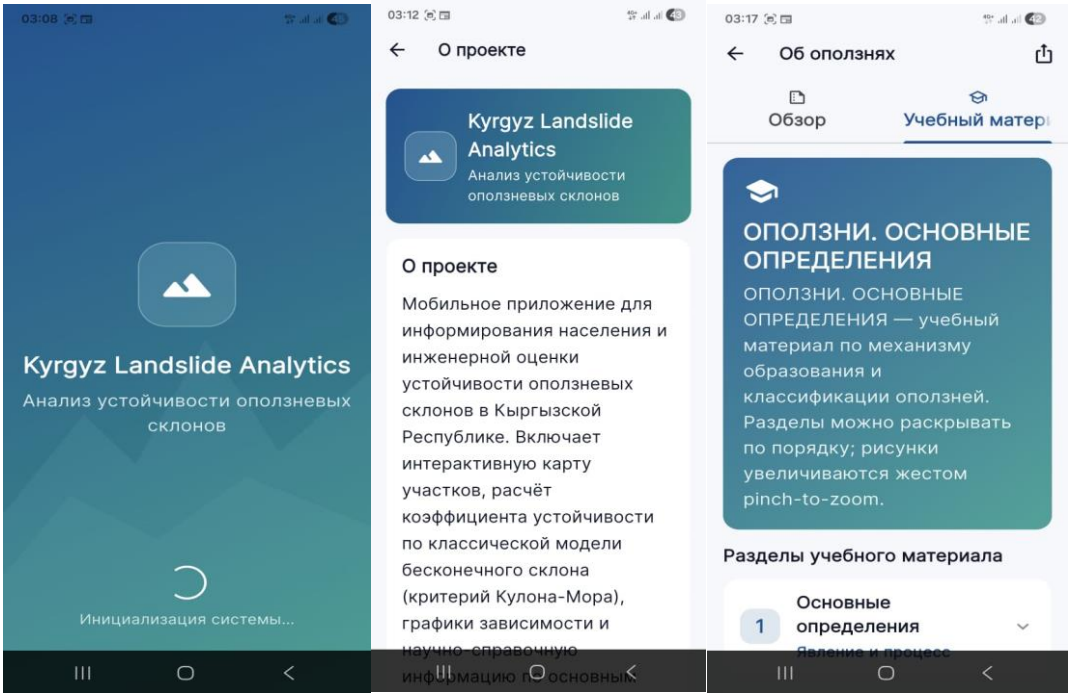


Рис 1. Главный интерфейс приложения

Оползни возникают тогда, когда природными процессами или с хозяйственной деятельности людей нарушается устойчивость горного склона. Силы связности грунтов или горных пород оказываются, в какой – то момент меньше, чем сила тяжести, тогда вся масса горного склона приходит в движение, и может произойти катастрофические смещения [1].

На сегодняшний день существует большое число классификаций оползней: оползни скольжения, выдавливания или сдвига, выплывания, гидродинамического разрушения, течения, разжижения, гидродинамического происхождения, а так же известно большое количество методов расчета устойчивости склонов, которые учитывают в своих расчетных схемах многообразие типов оползней и используют различные допущения, связанные с формой поверхности скольжения, местоположением областей грунта, находящихся в предельном состоянии, с определением коэффициента устойчивости и т.д.

В работе для расчета устойчивости склона рассмотрен метод круглоцилиндрической поверхности скольжения. Данный метод расчета устойчивости предполагает, что смещение массива происходит путем вращения оползневого монолитного тела вокруг центра. Условием предельного равновесия будет равенство моментов всех действующих на оползневое тело сил относительно точки “О”. При этом оползневое тело

разбивается на ряд отсеков и с учетом всех объемных масс γ всех слоев, слагающих оползневое тело, вычисляется вес каждого отсека P_i, который прикладывают к центру линии скольжения i - го отсека. Далее раскладывая P_i на составляющие, направленные по радиусу N_i и по касательной к линии смещения T_i, составляют уравнение равновесия [3]:

$$\sum T_i \cdot R - \sum N_i \cdot tg\varphi \cdot R - \sum c_i \cdot l_i \cdot R = 0 \qquad (1)$$

здесь R - радиус вращения оползневого тела; φ_i и c_i - угол внутреннего трения и сцепление грунта, выраженные через эффективное напряжение; L - длина дуги скольжения:

$$T_i = P_i \cdot \sin \alpha_i ; \qquad N_i = P_i \cdot \cos \alpha_i \qquad (2)$$

α -угол наклона вектора T_i к горизонту.

При этом внутренние силы взаимодействия по вертикальным стенкам отсеков в расчете не учитываются. Коэффициент устойчивости склона определяется соотношением суммы моментов сил, удерживающих оползневое тело, к сумме моментов сил, стремящихся его сдвинуть:

$$K_{уст} = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{сд}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i \cdot \cos \alpha_i \cdot tg\varphi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum_{i=1}^{N} P_i \cdot \sin \alpha_i} \qquad (3)$$

Следовательно, коэффициент устойчивости Ку определяется как отношение сдвигающих сил $F_{сд}$ к силам удерживающим Fуд. При этом возможны следующие два случая:

1) Ку>1 и тогда оползнеопасный склон будем считать устойчивым;

2) Ку<1 и тогда рассматриваемый оползнеопасный склон считается неустойчивым.

Метод круглоцилиндрической поверхности скольжения целесообразно применять, когда откос сложен однородными грунтами. Метод предполагает, что сползание грунта может произойти лишь в результате вращения оползающего массива вокруг центра О.

Следовательно, поверхность скольжения в данном случае будет представлена дугой некоторого круга с радиусом r, очерченного из центра О.

В статье опишем методику и алгоритм нахождения коэффициента устойчивости склона на реальных данных для конкретного оползня Кыргызстана методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

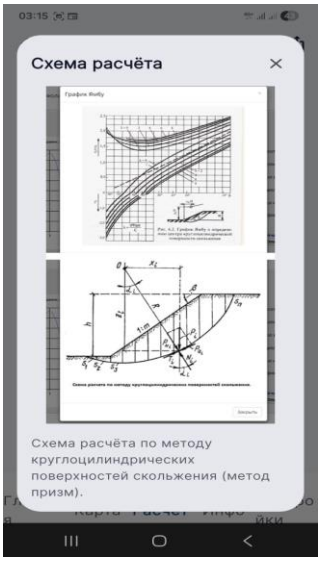


Рис. 2. Расчетная схема склона.

Устойчивость откосов зависит от:

- прочности грунтов, слагающий откос и в его основании (параметров сопротивления грунтов сдвигу φ; c);
- крутизны откоса;
- высоты откоса;
- нагрузок на поверхности откоса;
- фильтрация воды через откос.

Возможными причинами нарушения устойчивости откосов являются:

- излишняя его крутизна;
- подрезка откоса в нижней части;
- утяжеление откоса вследствие увлажнения грунта;
- уменьшение параметров сопротивления сдвигу грунта тела откоса вследствие увлажнения, промерзания и оттаивания и других факторов;
- нагрузка на гребень откоса;
- динамическое воздействие.

Задача расчета заключается в определении коэффициента устойчивости природного склона или откоса насыпи для наиболее опасной поверхности скольжения для изотропных массивов.

Пример расчета показан в статье [8]. Все расчеты в разработанном мобильном приложении, результаты совпадают.

Приложение реализовано на кроссплатформенном фреймворке Flutter с использованием языка Dart. Единая кодовая база компилируется для операционных систем Android и iOS, что устраняет необходимость в раздельной разработке под каждую платформу и сокращает трудозатраты на сопровождение.

Разработанная система позволяет:

- выполнять расчет коэффициента устойчивости склонов;
- сохранять результаты расчетов;
- вести базу исследуемых объектов;
- отображать уровень оползневой опасности;
- формировать отчеты по результатам исследований;
- осуществлять просмотр истории выполненных расчетов.

Интерфейс приложения спроектирован исходя из требований простоты и удобства работы пользователя. После запуска пользователь попадает на главный экран системы.

Главное меню включает следующие разделы:

1. Новый расчет.
2. История расчетов.
3. Справочник.
4. Карта объектов.
5. Настройки.
6. Информация о программе.

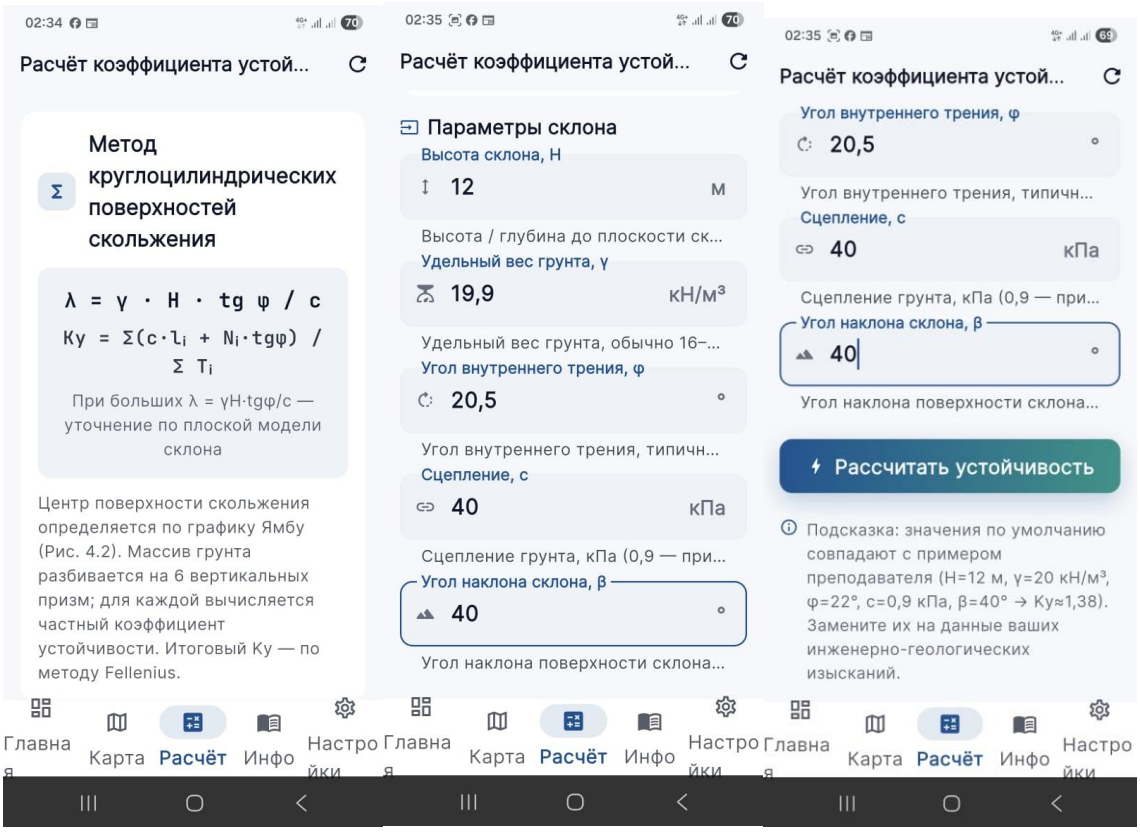


Рис 3. Страница мобильного приложения Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения

Все данные вводим в систему, как показано на рисунке 3, где задана формула Метода круглоцилиндрических поверхностей скольжения, ввод

параметров и при нажатии на рассчитать устойчивость, выходит результат Q=2,9, что склон устойчив. Как показано на рис 4, выходят результаты расчета, исходные параметры и график и схема расчета, где показаны коэффициент устойчивости по блокам.



Рис 4. Скрины мобильного приложения расчета устойчивости горного склона по заданным параметрам

По итогам можно скачать исходные данные и результаты метода по Ямбу.



Расчёт устойчивости оползневого склона			
Дата экспорта	19.06.2026 02:32		
Метод	ıостей скольжения		
Формула λ	λ = γ·H·tgφ / c		
Формула Ку	Σ(c·lᵢ + Nᵢ·tgφ) / Σ Tᵢ		
λ (расчётное)	2,23		
x_0/H (график Ямбу)	0,32		
y_0/H (график Ямбу)	1,51		
R — радиус дуги, м	18,55		
Число блоков	6		

ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Значение	Ед. изм.	Обозначение
Высота склона	12,000	м	H
Удельный вес грунта	19,900	кН/м³	γ
Угол внутреннего трения	20,500	°	φ
Сцепление	40,000	кПа	c
Угол наклона склона	40,000	°	β

РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЁТА

Коэффициент устойчивости Ку	2,594
Статус устойчивости	Склон устойчив
Нормальное напряжение σ, кПа	140,13
Касательное напряжение τ, кПа	117,59
Описание	Коэффициент устойчивости превышает нормативное

ГРАФИК: Ку по блокам (призмам)

Блок	Kyᵢ
1	-14,087
2	-58,332
3	6,732
4	2,764
5	1,666
6	1,172

ГРАФИК: Ку = f(c)

с, кПа	Ку
0,01	0,058
0,11	0,543
0,21	0,841
0,31	1,017
0,41	1,145
0,51	1,246
0,61	1,318
0,71	1,318
0,81	1,317
0,91	1,317
1,01	1,317
1,11	1,317
1,21	1,318
1,31	1,319
1,41	1,320
1,51	1,321
1,61	1,323
1,71	1,324
1,81	1,326
1,91	1,328
2,01	1,330
2,11	1,332
2,21	1,334
2,31	1,336
2,41	1,338
2,51	1,340
2,61	1,342
2,71	1,344
2,81	1,342
2,91	1,341
3,01	1,341
3,11	1,340
3,21	1,339
17,01	1,875
17,11	1,878
17,21	1,881
17,31	1,885
17,41	1,888
17,51	1,891
17,61	1,894
17,71	1,897
17,81	1,901
17,91	1,904
18,01	1,907
18,11	1,910
18,21	1,914
18,31	1,917
18,41	1,920
18,51	1,923
18,61	1,926
18,71	1,930
18,81	1,933
18,91	1,936
19,01	1,939
19,11	1,943
19,21	1,946
19,31	1,949
19,41	1,952
19,51	1,956
19,61	1,959
19,71	1,962
19,81	1,965
19,91	1,969

Категоризация по СНиП 2.02.02-85: Ку ≥ 1.30 — устойчив, 1.0(

Рис. 5. Скрины мобильного приложения расчета устойчивости горного склона и результаты Расчета на Excel

Из расчета из мобильного приложения следует, что откос находится в устойчивом состоянии и характеризуется минимальным коэффициентом запаса Кзап=2,1.

разработано мобильное приложение «Kyrgyz Landslide Analytics», предназначенное для автоматизации расчёта коэффициента устойчивости склонов и оперативной оценки оползневой опасности на территории Кыргызской Республики.

Приложение ориентировано на проведение расчёта устойчивости непосредственно в полевых условиях.

Рассматривались три основных подхода: нативная разработка отдельно под iOS и Android, кроссплатформенная разработка с использованием React Native (JavaScript), а также кроссплатформенная разработка с применением фреймворка Flutter (язык Dart).

Нативный подход предполагает создание двух независимых приложений на языках Swift/Objective-C для iOS и Kotlin/Java для Android. Такой подход обеспечивает максимальную производительность, однако требует вдвое больших временных и кадровых ресурсов, что нецелесообразно для учебного проекта с ограниченными сроками.

Платформа React Native позволяет использовать один кодовый базис на языке JavaScript с компиляцией в нативные компоненты. Однако данная платформа имеет известные проблемы с производительностью при сложной анимации и интенсивных математических вычислениях,

необходимых для расчёта коэффициента устойчивости склона.

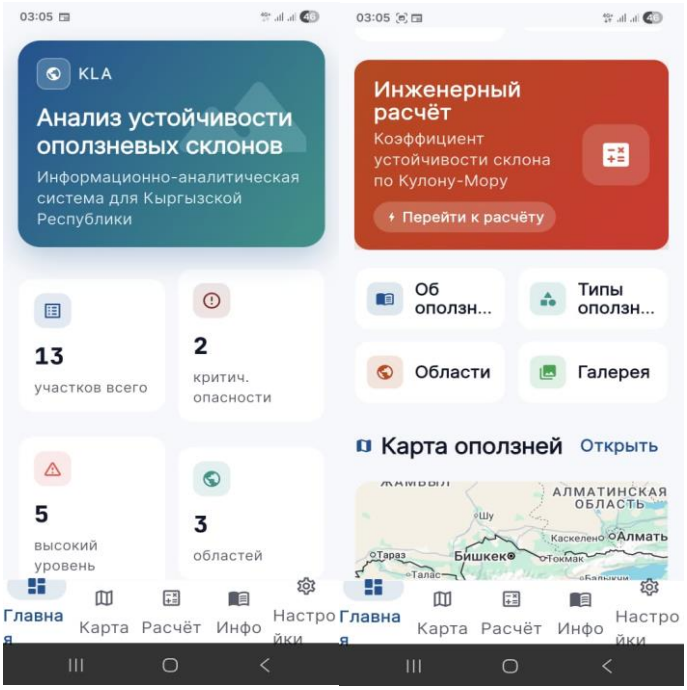


Рис 6. Анализ устойчивости оползневых склонов

После вычисления коэффициента выполняется автоматическая классификация состояния склона.

Интерактивная карта оползневых участков построена на пакете google_maps_flutter 2.10.0, обеспечивающем доступ к Google Maps SDK для Android и iOS. На карту нанесён набор landslideDataset — статические данные о зафиксированных оползневых событиях в трёх областях: Ошской, Джалал-Абадской и Баткенской.

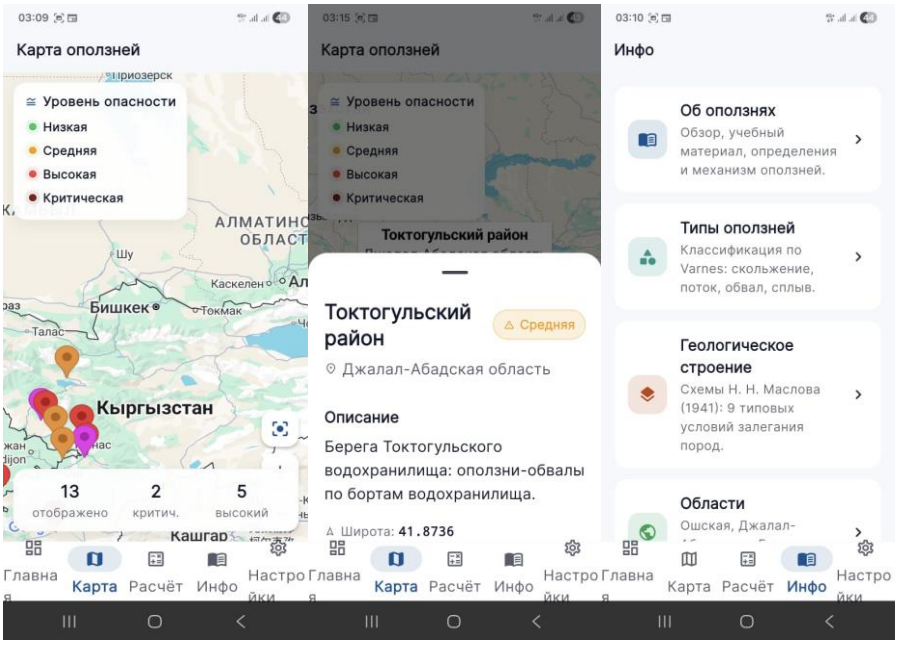


Рис. 7. Карта оползнеопасных участков

Дополнительные экраны (результат расчёта, детали региона, новость, типы оползней, геологическое строение) регистрируются на корневом уровне и открываются поверх shell через стандартный push-переход.

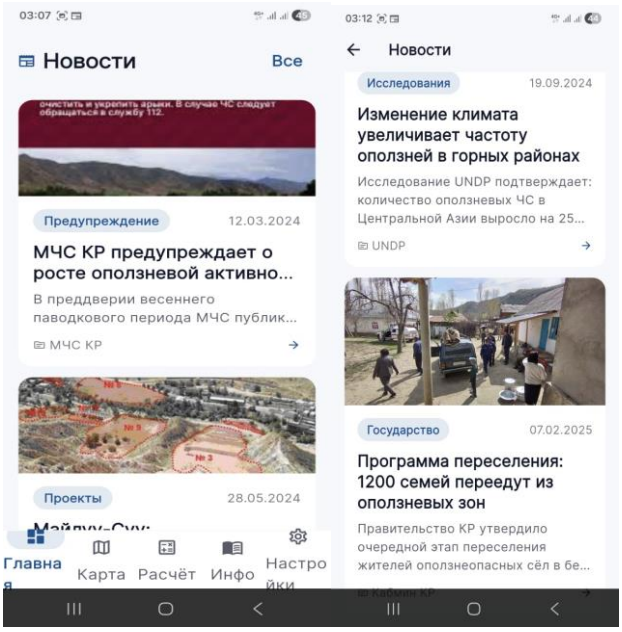


Рис. 8. Новости

В результате работы реализовано мобильное приложение «Kyrgyz Landslide Analytics» для автоматизированного расчёта коэффициента устойчивости склонов. Приложение выполняет инженерно-геологический расчёт непосредственно на мобильном устройстве, хранит данные об объектах, формирует отчёты и определяет уровень оползневой опасности.

Применение фреймворка Flutter и СУБД SQLite обеспечило кроссплатформенность решения и автономное хранение данных, что существенно в условиях отсутствия связи. Результаты тестирования подтвердили корректность вычислений и пригодность приложения для мониторинга опасных геологических процессов на территории республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихвинский Н.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов, -М., 1988., 183 с.
2. Тер-Степанян Г.И. Новые методы изучения оползней, - Ереван: изд. АН Арм. ССР, 1978, с.54.
3. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов - М.: Стройиздат, 1962. –с.76.

4. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии, - М.: Высшая школа, 1968, 511 с.
5. Мэтью Мак-Дональд, Адам Фримен, Марио Шпушта Pro ASP.NET 4 in C# 2010 4 Четвертое издание, Вильямс, 2011 г., 1424 с.
6. Нидерст Дж. Web–мастеринг для профессионалов. Настольный Пресс, 2000. – 640с.
7. Орозобекова А.К. «Оползневые процессы на территории юга Кыргызстана и их классификации», Материалы Республиканской научно-практической конференции «Проблемы строительной отрасли и пути их решения», - Бишкек, 2001 г.
8. Орозобекова А.К., Шадиев М.М., Кубанычбекова А.К. Экзогенно-катастрофические процессы Кыргызстана и применение ASP.NET технологий Вестник Кыргызстана №2, -Бишкек, 2017, -С. 273-279. https://elibrary.ru/item.asp?id=35168437
9. Бийбосунов И., Орозобекова А.К., Курманова Э. Устойчивость оползневых склонов и расчет гидродинамических течений // Сборник «Современные проблемы механики сплошных сред/ Гидрогазодинамика и экзогенно-геологические процессы природы» вып.6, - Бишкек, 2007. с. 13-25

УДК 517. 977.5. 928.2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАДАЧИ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ В ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ

Осмонов К.Т., Болотова А.Б., Нурласова С.Н.
КГТУ им. И. Раззакова

В статье рассматривается ламинарное течение несжимаемой вязкой жидкости в открытом канале секторного поперечного сечения. На стенках канала ставятся условия: прилипания; на свободной поверхности – нулевое и ненулевые касательные напряжения. Для решения задачи используется численный метод дробных шагов. Задача приводится на изопериметрической форме и решается для определения поля скоростей, расхода жидкости, оптимального параметра формы сечения канала при постоянной длине смоченного периметра. Был составлен общий алгоритм решения задачи, и соответствующие программы реализации. Результаты были оформлены в виде таблиц, графических изображений результатов. Сделаны соответствующие выводы, и проведен сравнительный анализ по относительным изменениям параметров решения.

***Ключевые слова*:** канал секторного сечения, ненулевые касательные напряжения, изопериметрическая задача, оптимальный параметр, метод дробных шагов, поля скоростей, расход жидкости, общий алгоритм решения задачи, графические изображения результатов.

АЧЫК КАНАЛДАРДАГЫ СУЮКТУКТАРДЫ ТРАНСПОРТТООДОГУ ЖОГОТУУЛАРДЫ МИНИМАЛДАШТЫРУУ ҮЧҮН МАСЕЛЕНИ ИЗИЛДӨӨНҮН ИНФОРМАЦИЯЛЫК ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Осмонов К.Т., Болотова А.Б., Нурласова С.Н.
И. Раззаков ат. КМТУ

Макалада сектордук туурасынан кесилишиндеги ачык каналындагы кысылбаган илээшкек суюктуктун ламинардык агымы каралат. Каналдардын: дубалдарында жабышуу; эркин бетинде – нөлдүк жана нөлдүк эмес жаныма чыңалууларынын шарттары коюлат. Маселени чечүү үчүн бөлчөк кадамдар сандык ыкмасы колдонулат. Маселе изопериметрлик түргө келтирилет жана ылдамдык талаасын, суюктуктун

зарпталышын, каналдын нымдалган периметринин узундугу туракту болгондо канал кесилишинин формасынын оптималдуу параметрин аныктоо үчүн чечилет. Маселени чечүүнүн жалпы алгоритми жана аны ишке ашыруунун тиешелүү программалары түзүлдү. Жыйынтыктар таблицалар, натыйжалардын графиктик сүрөттөлүштөрү түрүндө тарызделди. Тиешелүү тыянактар чыгарылып, чечимдин параметрлеринин салыштырмалуу өзгөрүүлөрү боюнча салыштырмалуу анализ жүргүзүлдү.

***Баштапкы сөздөр*:** сектордук кесилиштеги канал, нөлдүк эмес жаныма чыңалуусу, изопериметрлик маселе, оптималдуу параметр, бөлчөктүү кадамдар ыкмасы, ылдамдык талаалары, суюктук зарпталышы, маселени чечүүнүн жалпы алгоритми, натыйжалардын графиктик сүрөттөлүшү.

INFORMATION TECHNOLOGIES: RESEARCH PROBLEMS FOR MINIMIZING LOSSES IN FLUID TRANSPORTATION IN OPEN CHANNELS

Osmonov K.T., Bolotova A.B., Nurlasova S.N.
KSTU n.a. I. Razzakov

The article examines the laminar flow of an incompressible viscous fluid in an open channel with a sectoral cross-section. The following conditions are imposed on the channel walls: the no-slip condition; on the free surface — zero and non-zero shear stresses. To solve the problem, a numerical method of fractional steps is used. The problem is formulated in isoperimetric form and is solved to determine the velocity field, fluid flow rate, and the optimal parameter for the cross-sectional shape of the channel, given a constant wetted perimeter length. A general algorithm for solving the problem was developed, along with the corresponding implementation programs. The results were presented in the form of tables and graphical representations of the results. The relevant conclusions were drawn, and a comparative analysis was carried out based on the relative changes in the solution parameters.

***Keywords**:* sector-shaped channel, non-zero shear stresses, isoperimetric problem, optimal parameter, fractional step method, velocity fields, fluid flow rates, general algorithm for solving the problem, graphical representations of the results.

Широкий размах строительства оросительных систем, использования рек, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения требует глубокой разработки ряда научных проблем в гидравлике и гидродинамике открытых каналов и русел. Одним из важных вопросов является движение воды и формирование русла в потоке, имеющим непрямолинейное очертание в плане.

Облицовка каналов устраивается в целях снижения фильтрационных потерь, предохранения их от размыва и оползания откосов, снижения шероховатости поверхности их стенок, а также предотвращения зарастания канала водной растительностью, для защиты канала от поступления в него загрязненных почвенных вод [4].

В данной работе изучается задачи предотвращения потери вод при транспортировке и пути его преодоления, что является **актуальной**.

Для течения вязкой несжимаемой жидкости в прямом или закругленном бесконечном канале существенна безразмерная величина – число Рейнольдса $Re = \frac{\chi \cdot W}{\nu}$, где W - характерный масштаб скорости, χ - длина смоченного периметра, берем за характерную длину, v - кинематический коэффициент вязкости. В зависимости от соотношения сил вязкости и сил инерции поток может находиться в ламинарном, переходном или турбулентном режиме.

В настоящей работе рассмотрено ламинарное течение в каналах секторного поперечного сечения, где число Рейнольдса изменяется в умеренных значениях. Применением полярной системы координат [3] математическая модель движения описывается уравнением Пуассона в виде

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} = -\frac{g \sin\theta}{\nu}. \qquad (1)$$

Здесь r – радиус полярной оси $0 \le r \le R$, ϕ - полярный угол изменяемого в пределе $0 \le \phi \le \phi_N$, g – ускорение силы тяжести, θ - угол наклона оси течения канала к горизонту, $w = w(r, \phi)$ - скорость жидкости по продольному направлению канала относительно полярной системы координат.

Граничные условия отличаются формами задания по направлениям r и ϕ: в случае секторного сечения

$$W\big|_{r=0} = 0, \qquad W\big|_{r=1} = 0, \qquad (2)$$

$$W\big|_{\varphi=0} = 0, \qquad \frac{\phi_N + 1}{\chi} \cdot \frac{\partial W}{\partial \phi}\Big|_{\phi=\phi_N} = 0{,}052 W_{sh}, \qquad (3)$$

а в случае полукругового сечения рассматривается часть круга и выполняемые условия имеют следующие формы записи [1] для (3а)

$$\frac{\partial W}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0, \qquad W|_{r=1} = 0, \qquad (2а)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \phi}\Big|_{\phi=0} = 0{,}052\frac{\chi}{\pi} W_{sh}; \qquad \frac{\partial W}{\partial \phi}\Big|_{\phi=\pi} = 0{,}052\frac{\chi}{\pi} W_{sh}. \qquad (3а)$$

Переходим сначала к безразмерным величинам $\bar{r}$, $\bar{w}$, связанные с характерной длиной χ и другими характерными параметрами течения, параметром формы полярным углом ϕ_N- угла между свободной поверхностью и радиально расположенной донной стенкой, или при $0 \leq \phi_N \leq \pi$ боковой радиальной стенкой поперечного сечения канала. Связь между размерными и безразмерными величинами можно представить формулами:

$$w = W\bar{w} = \frac{\chi^2 g \cdot \sin\theta}{v}\bar{w}, \quad \bar{w} = \frac{v}{\chi^2 g \cdot \sin\theta} w, \qquad W = \frac{\chi^2 g \cdot \sin\theta}{v}. \qquad (4)$$

$$\chi = R + R\phi_N = (1+\phi_N)R; \qquad 0 < \phi \leq \phi_N; \qquad 0 < \phi_N \leq \pi \ , \qquad (4а)$$

$$R = \frac{\chi}{1+\varphi_N}\bar{R}; \qquad \bar{r} = \frac{\chi}{1+\varphi_N}\bar{r}, \qquad 0 \leq \bar{r} \leq \bar{R}. \qquad (4б)$$

С учетом выше указанных равенств уравнение (1) примет вид

$$W\frac{1}{\bar{R}^2}\left[\frac{1}{\bar{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(\bar{r} \cdot \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{r}}\right) + \frac{1}{\bar{r}^2}\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial \phi^2}\right] = -\frac{\chi^2 g \cdot \sin\theta}{4 \cdot v}. \qquad (1а)$$

Выбрасывая "черточки" в безразмерных величинах, сокращая на размерные величины, добавляя производную по времени $\frac{\partial W}{\partial t}$, из него получим в безразмерном виде уравнение параболического типа, чтобы применить схему переменных направлений численного метода дробных шагов [2]:

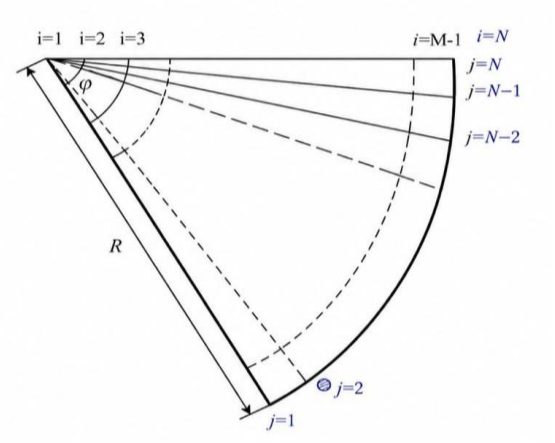
$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{R^2}\left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \frac{\partial W}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 W}{\partial \phi^2}\right] + 1. \qquad (6)$$

Граничные условия по направлениям r и ϕ: для секторного сечения

$$W\big|_{r=0} = 0, \qquad W\big|_{r=1} = 0, \qquad (7а)$$

$$W\big|_{\varphi=0} = 0, \qquad \frac{\partial W}{\partial \phi}\Big|_{\phi=\phi_N} = \frac{\chi}{1+\phi_N} 0{,}052 W_{sh}. \qquad (7б)$$

Перейдем к решениям краевых задач используя сеточную область.



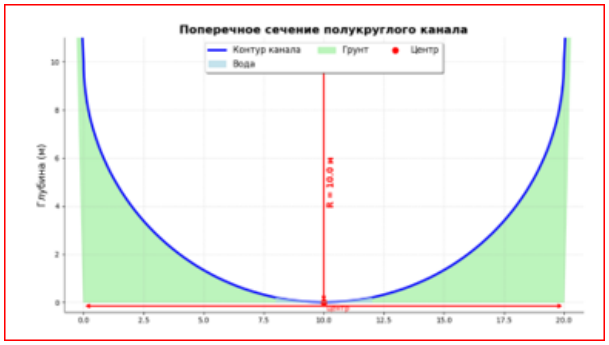


Рис. 1. Деления сектора с r_i и ϕ_j канала. Полукруговое сечение.

В левом рисунке 1 индексы *i* = 1, ... , M, *j* = 1, ... , N соответствуют изменениям узловых значений координатных величин по r_i и ϕ_j. В сеточных делениях принято, что M - число узлов сетки по r, N - число узлов по ϕ.

В частности, при изменении угла ϕ в пределе $-0{,}5 \cdot \pi \le \phi_n \le 0{,}5 \cdot \pi$ или $0 \le \phi_n \le \pi$ соответствует полукругу указанной в правом рисунке 1.

Для внутренней области при *i* = 2, ..., M-1, *j* = 2, ..., N-1 обозначим [2]:

$$\Lambda_{\phi\phi} W_{i,j} = \frac{W_{i,j+1} - 2W_{i,j} + W_{i,j-1}}{r_i^2 h_2^2} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \phi^2} + 0(h_2^{2}) \ , \qquad (8)$$

$$\Lambda_{rr} W_{i,j} = \frac{(1+\frac{h_1}{2r_i}) W_{i+1,j} - 2W_{i,j} + (1-\frac{h_1}{2r_i}) W_{i-1,j}}{h_1^2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial W}{\partial r}\right) + 0(h_1^2), \qquad (9)$$

где в случае секторного сечения вводим h_1 - шаг по r, h_2 - шаг по ϕ,

$$h_1 = \frac{1}{(\phi_N + 1) \cdot (M-1)}, \quad r_i = h_1 \cdot (i-1); \qquad h_2 = \frac{\phi_N}{N-1}, \quad \phi_j = h_2 \ (j\text{-}1). \qquad (10)$$

Аппроксимируя уравнение (6) схемой продольно-поперечной прогонки для *i* = 2, ... , M-1, *j* = 2, ... , N-1, для искомой функции *w* (*x, y*) на *n* –ом временном шаге $w_{i,j}^n = w\ (r_i, \phi_j, n\tau)$, а на $n+\frac{1}{2}$ –ом временном полушаге:

$$\widetilde{w}_{i,j} = w_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = w\ (r_i, \phi_j, (n+\tfrac{1}{2})\tau), \text{ где } n = 0, \tfrac{1}{2}, 1, 1\tfrac{1}{2}, 2, \ldots \qquad (11)$$

С учетом обозначений (8), (9), (10), (11) напишем уравнения (6), получим:

$$\frac{\widetilde{W}_{i,j} - W^n{}_{i,j}}{0.5\tau} = \frac{(1+\frac{h_1}{2r_i}) \widetilde{W}_{i+1,j} - 2\widetilde{W}_{i,j} + (1-\frac{h_1}{2r_i}) \widetilde{W}_{i-1,j}}{h_1^2} + \frac{W_{i,j+1}^n - 2W_{i,j}^n + W_{i,j-1}^n}{r_i^2 h_2^2} + 1, \qquad (12а)$$

$$\frac{W_{i,j}^{n+1} - \widetilde{W}_{i,j}}{0.5\tau} = \frac{(1+\frac{h_1}{2r_i}) \widetilde{W}_{i+1,j} - 2\widetilde{W}_{i,j} + (1-\frac{h_1}{2r_i}) \widetilde{W}_{i-1,j}}{h_1^2} + \frac{W_{i,j+1}^{n+1} - 2W_{i,j}^{n+1} + W_{i,j-1}^{n+1}}{r_i^2 h_2^2} + 1, \qquad (12б)$$

для *i* = 2, …, M-1; *j* = 2, …, N-1, где за начальное условие будем принять

$$w_{i,j}^0 = 0, \qquad i = 1, \ldots, M; \qquad j = 1, \ldots, N. \qquad (13)$$

При расчетах для производных в граничных условиях используются аппроксимации первых и вторых порядков точности. При использовании аппроксимации первого порядка $\frac{\phi_N + 1}{r} \cdot \frac{\partial W}{\partial \phi}\Big|_{\phi=\phi_N} = 0{,}052 W_{sh}$ из [1], имеют места

$$\widetilde{w}_{i,N} = \widetilde{w}_{i,N-1} + \frac{r_i}{\varphi_N + 1} h_2 0{,}052 W_{sh}, \qquad i = 2, \ldots, M\text{-}1, \qquad (14а)$$

$$w_{i,N}^{n+1} = w_{i,N-1}^{n+1} + \frac{r_i}{\varphi_N + 1} h_2 0{,}052 W_{sh}, \qquad i = 2, \ldots, M\text{-}1, \qquad (14б)$$

а при применении аппроксимации второго порядка точности имеет место

$$\widetilde{w}_{i,N}=\frac{4}{3}\widetilde{w}_{i,N-1}-\frac{1}{3}\widetilde{w}_{i,N-2}+\frac{r_i}{\varphi_N+1}h_2 0{,}052W_{sh},\quad i=2,\ldots,M-1, \text{ (15а)}$$

$$w_{i,N}^{n+1}=\frac{4}{3}w_{i,N-1}^{n+1}-\frac{1}{3}w_{i,N-2}^{n+1}+\frac{r_i}{\varphi_N+1}h_2 0{,}052W_{sh},\quad i=2,\ldots,M-1. \quad (15б)$$

Записываются условия прилипания (7а) и первый из (7б) в сеточных условиях

$$\widetilde{w}_{i,1}=0; \qquad i=1,\ldots,M,$$

(16а)

$$\widetilde{w}_{1,j}=0, \qquad \widetilde{w}_{M,j}=0, \qquad j=1,\ldots,N. \quad (17а)$$

$$w_{i,1}^{n+1}=0; \qquad i=1,\ldots,M,$$

(16б)

$$w_{1,j}^{n+1}=0, \qquad w_{M,j}^{n+1}=0, \qquad j=1,\ldots,N. \quad (17б)$$

На первом полушаге уравнения (12а) совместно с условиями (17а) составляет следующую замкнутую систему алгебраических уравнений

$$\widetilde{w}_{1,j}=0, \qquad j=2,\ldots,N, \quad (16в)$$

$$\widetilde{A}_i\widetilde{w}_{i-1,j}+\widetilde{B}\,\widetilde{w}_{i,j}+\widetilde{C}_i\widetilde{w}_{i+1,j}=f_{i,j}^n, \quad i=2,\ldots,M-1; \quad j=2,\ldots,N-1, \quad (18а)$$

$$\widetilde{w}_{M,j}=0, \qquad j=1,\ldots,N, \quad (17в)$$

которая решается методом прогонки, а полученным значениям добавляются значения из условий (16а) и (14а) или (15а).

Для второго полушага по времени уравнения (12б) совместно с условиями (17б) и (14б) или (15б) составляют замкнутую систему алгебраических уравнений:

$$w_{i,N}^{n+1}=w_{i,N-1}^{n+1}+\frac{r_i}{\varphi_N+1}h_2 0{,}052W_{sh}, \qquad i=2,\ldots,M-1, \quad (14б)$$

$$w_{i,j-1}^{n+1}+B\,w_{i,j}^{n+1}+w_{i,j+1}^{n+1}=\tilde{f}_{i,j}, \qquad i=2,\ldots,M-1;\ j=2,\ldots,N-1, \quad (18б)$$

$$w_{i,1}^{n+1}=0, \qquad i=1,\ldots,M,$$

(16в)

которая также решается методом прогонки, а полученным значениям добавляются значения из условий (16б) и (17б).

Здесь обозначены значения коэффициентов и свободных членов:

$$\tilde{A}_i=1-\frac{h_1}{2r_i}, \qquad \tilde{B}=-2\cdot\left(1+\frac{h_1^2}{\tau}\right), \qquad \tilde{C}_i=1+\frac{h_1}{2r_i}, \qquad B_i=-2\cdot\left(1+\frac{r_i^2h_2^2}{\tau}\right),$$

(19)

$$f_{i,j}^{n} = 2h_1^2 \cdot \left(\frac{1}{r_i^2 h_2^2} - \frac{1}{\tau}\right) W_{i,j}^{n} - \left(\frac{h_1}{r_i h_2}\right)^2 \cdot \left(W_{i,j+1}^{n} + W_{i,j-1}^{n}\right) - h_1^2 ,$$

(20)

$$\tilde{f}_{i,j}^{n} = 2r_i^2 h_2^2 \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{\tau}\right) \tilde{W}_{i,j} - \left(\frac{r_i h_2}{h_1}\right)^2 \cdot \left[\left(1 + \frac{h_1}{2r_i}\right) \tilde{W}_{i+1,j} + \tilde{A}_i \tilde{W}_{i-1,j}\right] - r_i^2 h_2^2.$$

(21)

Сопоставляя (16в) с алгебраическим уравнением (18а) при i = 2, определив

$$\tilde{w}_{2,j} = -\frac{\tilde{C}_1}{\tilde{B}} \tilde{w}_{3,j} + \frac{1}{\tilde{B}} f_{2,j}^{n}, \qquad i = 2; \qquad j = 2, \ldots, N\text{-}1, \qquad (18в)$$

можно найти начальные значения коэффициентов прогонки

$$\tilde{X}_2 = -\frac{\tilde{C}_1}{\tilde{B}}; \qquad \tilde{Y}_{2,j} = f_{2,j}^{n}/\tilde{B}, \qquad j = 2, \ldots, N\text{-}1. \qquad (22)$$

Соотношения прогонки составляется сопоставлением следующих формул

$$\tilde{A}_i \tilde{w}_{i-1,j} + \tilde{B} \tilde{w}_{i,j} + \tilde{C}_i \tilde{w}_{i+1,j} = f_{i,j}^{n}, \qquad i = 3, \ldots, M\text{-}1; \; j = 2, \ldots, N\text{-}1,$$

(18а)

$$\tilde{w}_{i,j} = \tilde{X}_i \tilde{w}_{i+1,j} + \tilde{Y}_{i,j}, \qquad (23)$$

откуда и получим

$$\tilde{w}_{i,j} = -\frac{\tilde{C}_i}{\tilde{A}_i \tilde{X}_{i-1} + \tilde{B}} \tilde{w}_{i+1,j} + \frac{f_{i,j}^{n} - \tilde{A}_i \tilde{Y}_{i-1,j}}{\tilde{A}_i \tilde{X}_{i-1} + \tilde{B}}, \qquad (24)$$

$$\tilde{X}_i = -\frac{\tilde{C}_i}{\tilde{A}_i \tilde{X}_{i-1} + \tilde{B}}, \qquad i = 3, \ldots, M\text{-}1; \qquad \tilde{Y}_{i,j} = \frac{f_{i,j}^{n} - \tilde{A}_i \tilde{Y}_{i-1,j}}{\tilde{A}_i \tilde{X}_{i-1} + \tilde{B}}, \; j = 2, \ldots, N\text{-}1. \qquad (25)$$

Сопоставляя (15б) с алгебраическим уравнением (18б) при j = N-1

$$W_{i,N-2}^{n+1} - 4W_{i,N-1}^{n+1} + 3W_{i,N}^{n+1} = \frac{r_i}{\varphi_N + 1} h_2 0{,}052 W_{sh}, \quad i = 2, \ldots, M\text{-}1. \qquad (15г)$$

$$W_{i,N-2}^{n+1} + B W_{i,N-1}^{n+1} + W_{i,N}^{n+1} = \tilde{f}_{i,N-1}, \qquad i = 2, \ldots, M\text{-}1,$$

(18г)

Для второго полушага будем получить следующую систему:

$$W_{i,1}^{n+1} = 0, \qquad i = 1, \ldots, M,$$

(16в)

$$w_{i,j-1}^{n+1} + B w_{i,j}^{n+1} + w_{i,j+1}^{n+1} = \tilde{f}_{i,j}, \quad i = 2, \ldots, M\text{-}1; \; j = 2, \ldots, N\text{-}1, \qquad (18б)$$

$W_{i,N}^{n+1}$= (2+$\frac{B}{2}$)$W_{i,N-1}^{n+1}$+ $\frac{r_i}{\varphi_N+1}$ $h_2$0,052W_{sh}- $\frac{1}{2}$ $\tilde{f}_{i,N-1}$, i = 2, …, M-1.

(18д)

Из последнего уравнения полученной системы имеем

X_N= 2+$\frac{B}{2}$; $Y_{i,N}$= $\frac{r_i}{\varphi_N+1}$ $h_2$0,052W_{sh}- $\frac{1}{2}$ $\tilde{f}_{i,N-1}$, i = 2, …, M-1,

(26)

а для i = 2, …, M-1; j = N-1, …, 2 имеются рекуррентные соотношения

X_j= -$\frac{1}{B+X_{j+1}}$; $Y_{i,j}$= $\frac{\tilde{f}_{i,j}-Y_{i,j+1}}{B+X_{j+1}}$, i = 2, …, M-1; j = N-1, …, 2. (27)

Полученной формулой прогонки определяются скорости

$w_{i,j}^{n+1}$= X_j $w_{i,j-1}^{n+1}$+$Y_{i,j}$, i = 2, …, M-1; j = 2, …, N-1, (28)

которая также решается методом прогонки, а полученным значениям добавляются значения из условий (16б) и (17б). Недостающие же значения в данной области добавляются из еще неиспользованных граничных условий.

Итак, для одного шага по времени во всей области определяется поле скоростей, а для следующего шага по времени счет повторяется аналогично предыдущему случаю. Воспользуемся также формулами:

$\Delta S_{i,j}$= $(r_{i+1}-r_i)\frac{(r_{i+1}+r_i)(\phi_{j+1}-\phi_j)}{2}$= $\frac{(r_{i+1}^2-r_{i\backslash}^2)(\phi_{j+1}-\phi_j)}{2}$, (26а)

соответствующая средняя скорость вычисляется по формуле

$(w_{i,j})_{ср} = \frac{1}{4}(w_{i,j}+w_{i+1,j}+w_{i,j+1}+w_{i+1,j+1})$,

(26б)

Процесс попеременного вычисления поля скоростей по каждому шагу по времени продолжается до тех пор, пока суммарные скорости последующего и предыдущего временного слоя мало отличается друг от друга, то есть удовлетворяет определенной точности ε. Зная суммарные скорости, для каждого шага по времени вычисляется безразмерная функция расхода

$Q^n = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{M-1}\left[\sum_{l=1}^{N-1}\left(W_{i,j}^n+W_{i+1,j}^n+W_{i,j+1}^n+W_{i+1,j+1}^n\right)\cdot\Delta S_{i,j}\right]$.

(27)

а общий счет схемы продолжается до выполнения неравенства

$\frac{|Q^{n+1}-Q^n|}{|Q^{n+1}|} \le \varepsilon = 0{,}00001$, (28)

после чего можно положить $Q(\phi_N, U_{sh}) = Q^{n+1}$.

Был составлен общий алгоритм и соответствующая программа решения задачи, составлены графики, указывающие на картину течения жидкости.

Использовались размеры сеток: сначала для MxN = 11x11; а также и для MxN =21x21, и в этих сеточных значениях были получены распределения скоростей по некоторым радиальным направлениям r_i=Δr (i - 1) =$h_1 \cdot (i-1)$, при изменении ϕ_j = $\Delta\phi$ (j-1) =h_2 (j-1). Приведены результаты расчетов для разных параметров формы ϕ_Nпри заданной длине периметра χ.

Будем привести сначала одного из выведенных табличных данных результата вычисления с использованием значений при выборе сеточных значений MxN = 11x11, для χ = 3, 4, 8; $\phi_N = \frac{\pi}{12}; \frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{3}$ и некоторые другие, показанные на верхней строке ниже табличного вывода, выделенной жирным шрифтом. Там же в нижних строках: на верхней части расположенные нулевые значения соответствуют условию прилипания крайне левой точки, откуда начинаются радиальные узловые оси; на нижней части расположенные нулевые значения соответствуют условию прилипания крайне правой линии, где заканчиваются радиальные узловые оси; на крайне левой части табличного вывода нулевые значения соответствуют условию прилипания самой нижней радиальной линии; а на крайне правой части табличного вывода **ненулевые** значения соответствуют условию на свободной поверхности .

Ниже на рисунках 2а, 2б, 2в графически представлены семейства распределения скоростей для столбцов j=1, 2, …, 11, соответствующие значениям, расположенные на столбцах таблицы 1: $w_{i,1}$=w (r_i,ϕ_1); …; $w_{i,11}$=w (r_i,ϕ_{11}) при USH=0, силы трения на свободной поверхности 0.

Таблица 1

HAPPA= 4.0 USH= 0.0 ALF=0.000 PHN= 1.0472 R1=0.00000 RM=1.31268 QWS= 0.00794

0.0 0.0002 0.0015 0.0014 0.0036 0.0048 0.0070 0.0091 0.0120 0.0159 0.0000
0.0 0.0002 0.0015 0.0015 0.0037 0.0051 0.0075 0.0100 0.0136 0.0188 0.0000
0.0 0.0003 0.0018 0.0022 0.0048 0.0068 0.0097 0.0130 0.0174 0.0238 0.0000
0.0 0.0003 0.0020 0.0025 0.0052 0.0074 0.0106 0.0141 0.0189 0.0259 0.0000
0.0 0.0003 0.0021 0.0027 0.0055 0.0078 0.0111 0.0148 0.0198 0.0271 0.0000
0.0 0.0003 0.0021 0.0028 0.0056 0.0080 0.0114 0.0151 0.0201 0.0276 0.0000
0.0 0.0003 0.0021 0.0029 0.0056 0.0081 0.0114 0.0151 0.0202 0.0275 0.0000

0.0 0.0003 0.0020 0.0029 0.0055 0.0080 0.0112 0.0149 0.0197 0.0267 0.0000
0.0 0.0003 0.0017 0.0028 0.0050 0.0075 0.0103 0.0137 0.0180 0.0241 0.0000
0.0 0.0002 0.0012 0.0023 0.0036 0.0057 0.0077 0.0102 0.0132 0.0173 0.0000
0.0 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

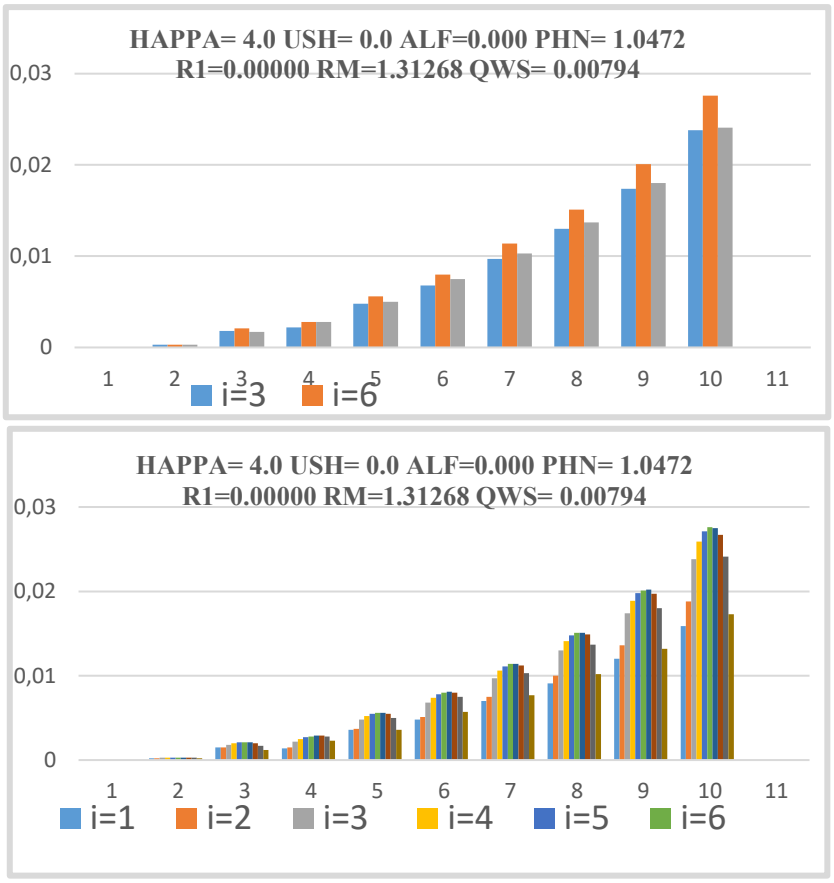


Рис. 2: а) Данные столбцов 3, 6 и 11; б) По данным всех столбцов таблицы 1.

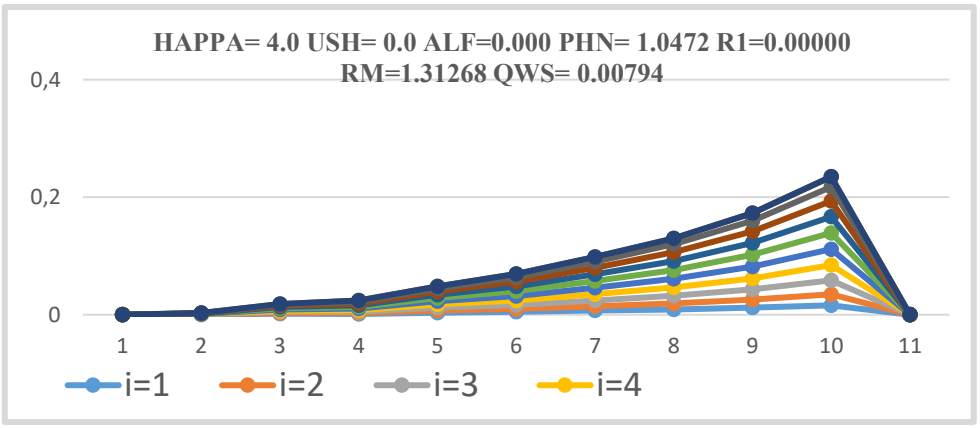


Рис. 2в. По данным всех столбцов таблицы 1.

Результаты расчёта скоростей W в канале секторного сечения при фиксированных значениях HAPPA = 8.0 [5] и PHN = 0.2618 (угол 15°) для USH = {-2.0, -1.5, -1.0, -0.5, +0.0, +0.5, +1.0, +1.5, +2.0}. Для каждого значения USH получены числовые значения w (r_i,ϕ_j, USH) на сетке 21×21, затем графическое представление этих значений в виде изотах (линий равных скоростей).

Таблица 2

HAPPA = 8.0 USH = -2.0 PHN = 0.2618 (15°) RM = 6.3402 SQ = 0.5045 QWS = 0.04138

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
0	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
0	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
0	0.0004	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
0	0.0006	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
0	0.0009	0.001	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.001	0.001
0	0.0011	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013
0	0.0014	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
0	0.0017	0.002	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.002	0.002	0.002
0	0.002	0.0024	0.0025	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024
0	0.0023	0.0028	0.0029	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028	0.0028
0	0.0026	0.0032	0.0033	0.0033	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
0	0.003	0.0036	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037	0.0036	0.0036
0	0.0034	0.004	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
0	0.0038	0.0045	0.0046	0.0046	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045
0	0.0043	0.0051	0.0052	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
0	0.005	0.0062	0.0063	0.0063	0.0063	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
0	0.0069	0.0092	0.0099	0.0101	0.0102	0.0102	0.0103	0.0103	0.0102	0.0102
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.0001	-0.0001	-0.0003	-0.0004	-0.0007	-0.0014
0.0001	0.0001	0	0	-0.0001	-0.0002	-0.0004	-0.0008	-0.0014	-0.0027
0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0003	-0.0008	-0.0016	-0.0036
0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0001	-0.0001	-0.0004	-0.001	-0.0022	-0.0049
0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0001	-0.0004	-0.0012	-0.0026	-0.006
0.0008	0.0007	0.0007	0.0006	0.0005	0.0002	-0.0003	-0.0013	-0.003	-0.0071
0.001	0.001	0.001	0.0009	0.0007	0.0004	-0.0002	-0.0013	-0.0034	-0.0082
0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.001	0.0006	0	-0.0013	-0.0038	-0.0092
0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0013	0.0009	0.0002	-0.0013	-0.0041	-0.0102
0.002	0.002	0.0019	0.0018	0.0016	0.0012	0.0004	-0.0012	-0.0043	-0.0111
0.0024	0.0024	0.0023	0.0022	0.002	0.0016	0.0007	-0.0011	-0.0046	-0.012
0.0028	0.0028	0.0027	0.0026	0.0024	0.0019	0.001	-0.0009	-0.0048	-0.0128
0.0032	0.0032	0.0031	0.003	0.0028	0.0023	0.0013	-0.0007	-0.0049	-0.0137
0.0036	0.0036	0.0036	0.0034	0.0032	0.0027	0.0016	-0.0005	-0.005	-0.0144
0.0041	0.004	0.004	0.0039	0.0036	0.0031	0.002	-0.0002	-0.0051	-0.0152
0.0045	0.0045	0.0045	0.0043	0.0041	0.0036	0.0024	0	-0.0052	-0.0159
0.0051	0.0051	0.005	0.0049	0.0047	0.0041	0.0029	0.0004	-0.0053	-0.0166
0.0062	0.0062	0.0061	0.006	0.0057	0.0051	0.0037	0.0009	-0.0053	-0.0173
0.0102	0.0101	0.0099	0.0096	0.0091	0.008	0.0061	0.0024	-0.0048	-0.0175
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Численными расчетами получены значения поля скоростей при отрицательных и положительных значениях USH. Для USH = -2.0 (встречный ветер над свободной поверхностью) наблюдается зона обратного течения. Расход по сечению QWS = 0.04138 зависит и от площади сечения SQ = 0.5045, канала, уменьшается в зависимости от отрицательных значений W на свободной поверхности, как видно из нижней линии графика рисунка 8б.

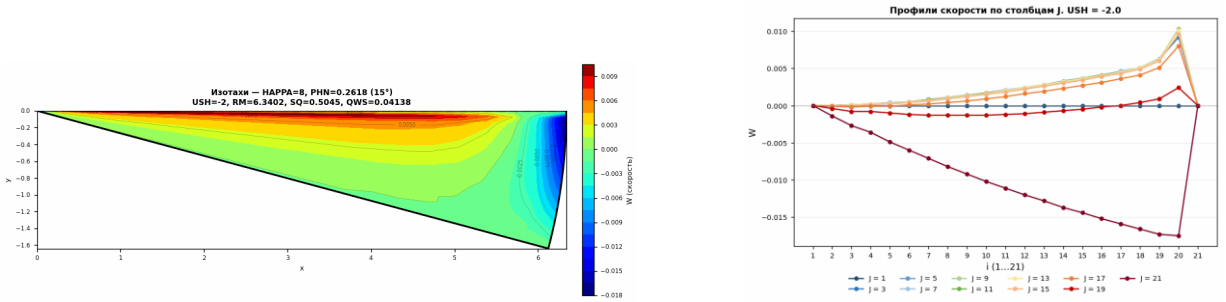


Рис. 8. а) Изотахи; б) Профили скоростей по столбцам J таблицы 2.

Далее, не приведя табличные значения вычислений, приведем каждого рисунка изотах (линии равных скоростей), линейно-точечного графика распределения скоростей вблизи свободной поверхности, где ощутимо меняются картина послойного течения жидкости.

Для USH = -1 наблюдается также зона обратного течения у внешней дуги канала (отрицательные W). Расход через сечение QWS = 0.04722.

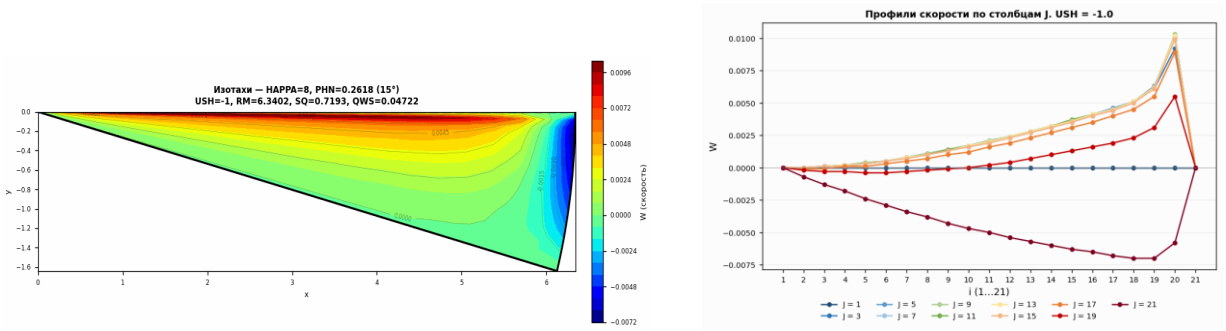


Рис. 9: а) Линии равных скоростей; б) Профили скоростей по столбцам J.

Для USH = - 0.5. При малом отрицательном значении USH (встречный ветер у свободной поверхности уменьшен) наблюдается небольшая зона обратного течения у свободной поверхности. Расход жидкости QWS = 0.04992.

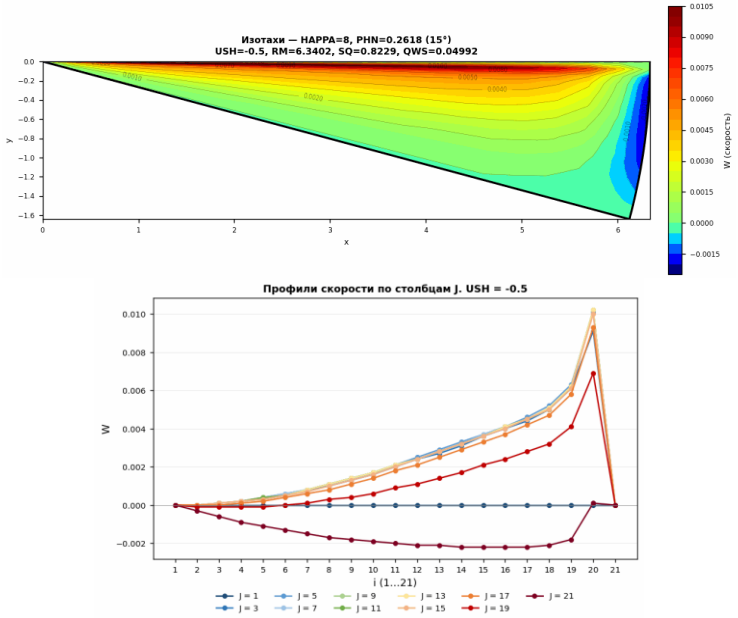


Рис. 10: а) Линии равных скоростей; б) Скорости по столбцам J.

Для USH = 0, ветер отсутствует, скорость во всей области неотрицательна, обратные слои течения не возникают. Расход через сечение QWS = 0.05268.

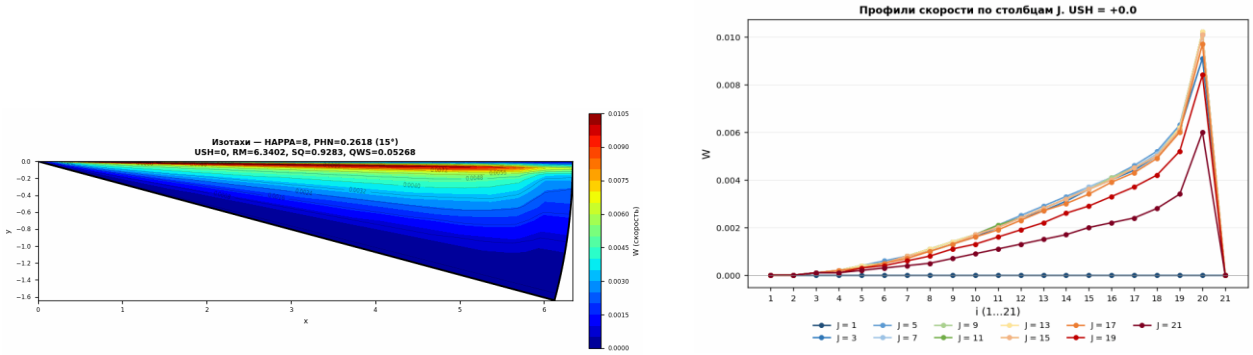


Рис. 11: а) Линии равных скоростей; б) Профили скоростей столбцов J.

Для USH = +1.0 (попутный ветер) скорость во всей области положительна, как на рис. 11б. Расход сравнительно увеличен QWS = 0.05821.

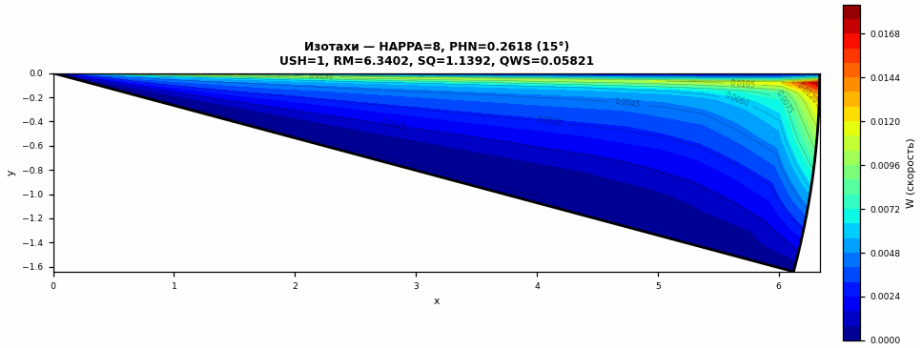


Рис. 12. Линии равных скоростей при USH = 1.

При USH = +2.0 скорость повсюду, и на свободной поверхности увеличивается (рис. 13б), и суммарно увеличен QWS = 0.06374.

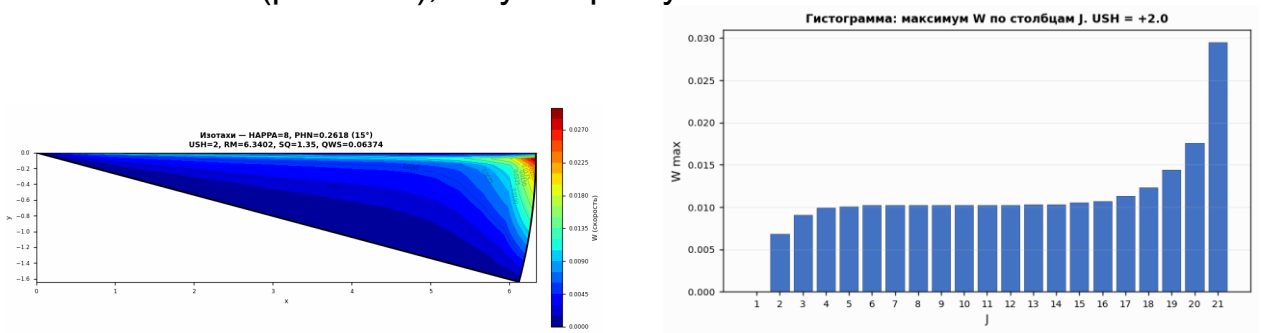


Рис. 13. а) Линии равных скоростей; б) Профили скоростей столбцов J.

Также приведены результаты расчёта для площади поперечного сечения канала SQ = 1.7263 для сравнительно расширенного угла сектора PHN = 0.5236 (= 30°). Для USH = -2.0, расход сравнительно уменьшен QWS = 0.18425 за счет влияния отрицательного трения на свободной поверхности (рис. 14б).

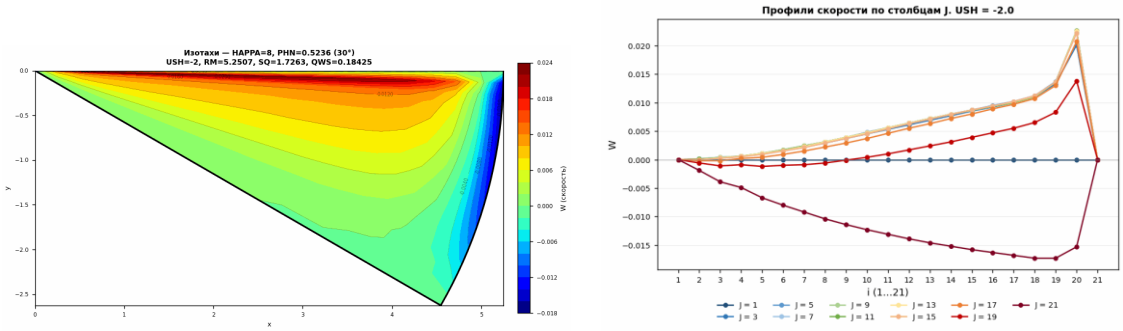


Рис. 14: а) Линии равных скоростей; б) Профили скоростей столбцов J.

При значении USH = 0, ветер отсутствует, скорость во всей области неотрицательна, расход QWS = 0.20464, а для USH = +2.0 скорость во всей области увеличивается, увеличивается и расход за счет попутного трения на свободной поверхности QWS = 0.22503.

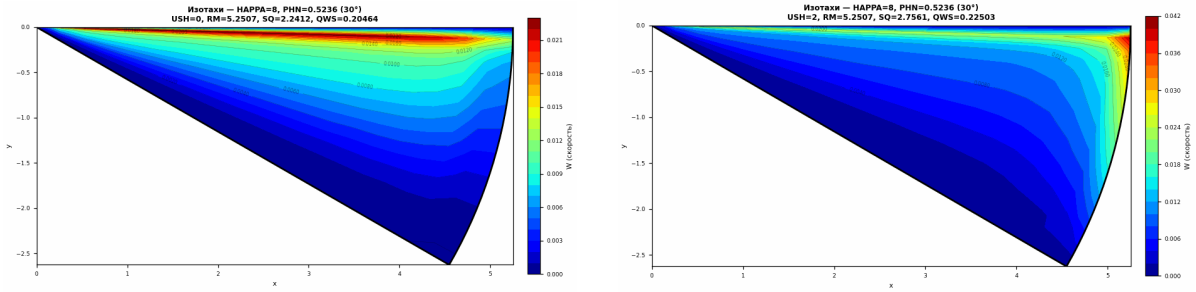


Рис. 15. Линии равных скоростей J: а) при USH = 0; б) при USH = + 2.

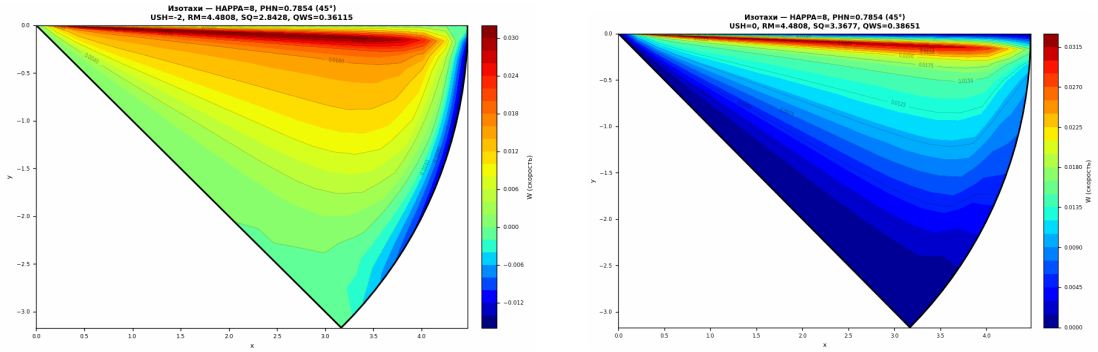


Рис. 16. Линии равных скоростей J: а) при USH = -2; б) при USH = 0.

Для еще более расширенного угла сектора PHN = 0.7854 (= 45°), и, следовательно, для площади поперечного сечения канала SQ = 2.8428, при USH = -2.0, QWS = 36115; для USH = 0, расход через сечение QWS = 0.38651 (рис. 16), а для USH = +2.0, QWS = 0.41187 (рис. 17б).

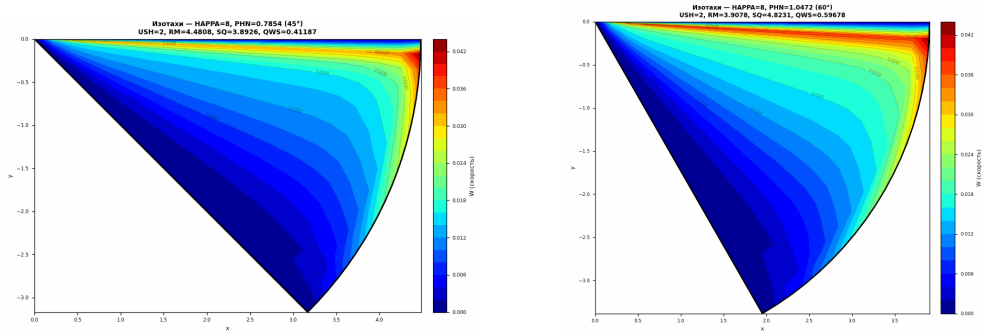


Рис. 17. Изотахи по J для USH = 2: а) при PHN = 45°; б) при PHN = 60°.

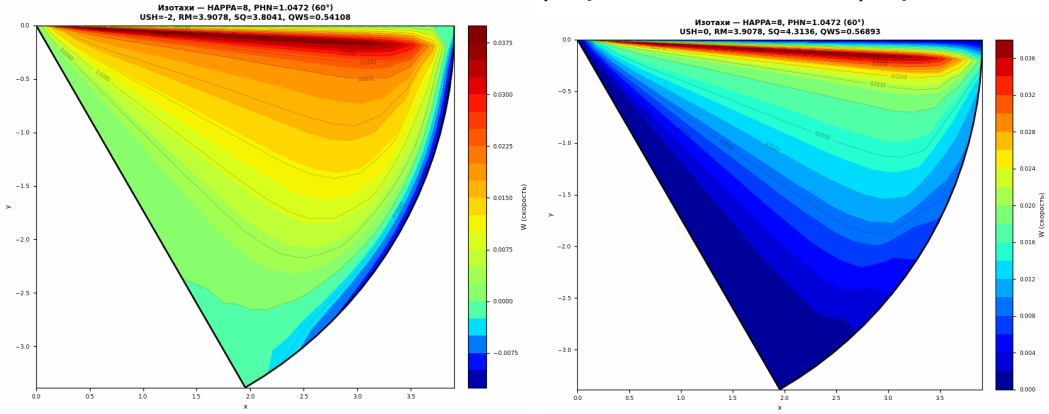


Рис. 18. Изотахи по J для PHN = 60°: а) при USH = -2; б) при USH = 0.

Для более расширенного угла сектора PHN = 1.0472 (= 60°), и, следовательно, для площади поперечного сечения канала SQ = 4.8231, при USH = -2.0, QWS = 0.36115; для USH = 0, расход через сечение QWS = 0.38651 (рис. 16), а для USH = +2.0, QWS = 0.41187 (рис. 17б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопин Г. А. Влияние стратификации на касательные напряжения между воздушным потоком и свободной поверхностью // Метеорология и гидрология. - 1971. - № 8. - С. 43-49.

2. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967. –225 с.
3. Осмонов К.Т. Аналитическое и численное решения задач течения вязкой жидкости в открытых каналах при умеренных числах Рейнольдса: Дисс...к.ф.-м.н. М., 1993. 01.02.05; утв. 12.02.93. - Бишкек, 1992. – 99 с.
4. Чернов М. А. Обоснование противофильтрационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов / М. А. Чернов // Известия вузов. Сев.-Кав. регион, Техн. науки. – 2011. – № 2. С. 108-114.
5. Полиа Г., Сеге Г. Изопериметрические неравенства в математической физике. Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Копылова. – М.: Гос. изд. Физ.-мат. литературы, 1962. -336 с.

УДК 624.19+556.3

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРИ ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР
[2]Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Подземное строительство в условиях высокогорья оказывает значительное влияние на гидрогеоэкологическое состояние территории. В результате строительных работ происходит нарушение естественного водного и химического баланса подземных вод и как в зоне непосредственного строительства, так и в смежных районах. Это приводит к региональному истощению ресурсов подземных вод, изменению направлений и объемов их питания, а также нарушению связи с поверхностными водоемами и водотоками. Формируются обширные зоны техногенной аэрации, способствующие деградации природного влажностного режима почв и грунтов, что, в свою очередь, усиливает процессы эрозии, оползней и снижает устойчивость экосистем. В работе рассматривается механизмы загрязнения, последствия для водных и ледниковых объектов и предлагаются рекомендации по минимизации негативного воздействия.

***Ключевые слова*:** подземное строительство, высокогорье, загрязнение вод, подземные воды, поверхностные воды, гидрогеология, техногенное воздействие, экологическая безопасность, водоотведение.

БИЙИК ТООЛУ ШАРТТАРДА ЖЕР АЛДЫНДАГЫ КУРУЛУШТАРДЫ ЖҮРГҮЗҮҮДӨ ЖЕР АСТЫНДАГЫ СУУЛАРДЫН ЖАНА ЖЕР ҮСТҮНДӨГҮ СУУНУН БУЛГАНЫШЫН ТАЛДОО

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Механика, автоматика жана геомеханика институту,
[2]И.Раззакова атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Бийик тоолуу шарттарда жер астындагы курулуш аймактын гидрогеоэкологиялык абалына олуттуу таасирин тийгизет. Курулуш иштеринин натыйжасында жер астындагы суулардын табигый суу жана химиялык балансы түздөн-түз курулуш зонасында да, чектеш аймактарда

да бузулат. Бул жер астындагы суулардын ресурстарынын региондук түгөнүшүнө, алардын азыктануу багыттарынын жана көлөмдөрүнүн өзгөрүшүнө, ошондой эле жер үстүндөгү көлмөлөр жана суу агымдары менен байланыштын бузулушуна алып келет. Кыртыштын жана кыртыштын табигый нымдуулук режиминин бузулушуна өбөлгө түзүүчү техногендик аэрациянын кеңири зоналары түзүлүүдө, бул өз кезегинде эрозия, жер көчкү процесстерин күчөтөт жана экосистемалардын туруктуулугун төмөндөтөт. Макалада булгануу механизмдери, суу жана мөңгү объектилери үчүн кесепеттери каралып, терс таасирлерди азайтуу боюнча сунуштар сунушталат.

***Баштапкы сөздөр*:** жер астындагы курулуш, бийик тоолуу аймактар, суунун булганышы, жер астындагы суулар, жер үстүндөгү суулар, гидрогеология, техногендик таасир, экологиялык коопсуздук, сууну агызуу.

ANALYSIS OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER POLLUTION DURING UNDERGROUND CONSTRUCTION IN HIGH-ALTITUDE CONDITIONS

Isagalieva[1] S.U., Meimanbek[2] k. A.
[1]Institute of Mechanical Science, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
[2]Kyrgyz State Technical University named after. I. Razzakov

Underground construction in the highlands has a significant impact on the hydrogeoecological condition of the territory. As a result of construction work, the natural water and chemical balance of groundwater is disrupted both in the area of direct construction and in adjacent areas. This leads to a regional depletion of groundwater resources, a change in the directions and volumes of their supply, as well as disruption of communication with surface reservoirs and watercourses. Extensive zones of technogenic aeration are being formed, contributing to the degradation of the natural moisture regime of soils and soils, which, in turn, enhances the processes of erosion, landslides and reduces the stability of ecosystems. The paper examines the mechanisms of pollution, the consequences for water and glacial objects, and offers recommendations for minimizing negative impacts.

***Keywords*:** underground construction, highlands, water pollution, groundwater, surface waters, hydrogeology, anthropogenic impact, environmental safety, sanitation.

Источники и механизмы загрязнения подземных вод при подземном строительстве.

Под истощением подземных вод понимается сокращение их естественных запасов, обусловленное превышением темпов водоотбора при дренировании водоносных пластов над интенсивностью их пи-тания.

Если при этом происходит бесцельный сброс дренажных вод в речную сеть, то такое истощение наносит прямой экологический ущерб или приводит к существенному ухудшению условий водопользования в горно-строительном районе.

Отбор подземных вод в количестве, превышавшем установленные эксплуатационные запасы, приводит к истощению эксплуатационных ресурсов подземных вод. Этим создается ситуация, когда осушение участка подземного строительства вызывает сокращение планируемых сроков эксплуатации водозаборов хозяйственно - питьевого назначения.

Влияние подземного дренажа максимально проявляется в закрытых артезианских структурах, где сокращение ресурсов артезианских вод носит необратимый характер, и характеризуется перераспределением вод между отдельными водоносными комплексами в зависимости от условия их вскрытия дренажными работами. Кардинальное распределение про-исходит на участках подземных разработок системами обрушения кровли, где за счет техногенной трещиноватости над выработками образуется зона резко нарушенной сплошности «водоупоров».

Изменение исходной гидрохимической обстановки в районах подземного строительства обусловлено инфильтрацией сточных вод из поверхностных техногенных бассейнов, содержащих растворы, образующиеся в процессе горно-строительных работ. Загрязнённые воды могут поступать как с поверхности, нарушенной строительной и горной деятельностью, так и из старых выработок, а также из загрязнённых естественных водоёмов. Однако миграция промышленных стоков с поверхности не единственный путь попадания загрязняющих веществ в подземные горизонты.

Снижение напоров в результате дренажных работ, а также развитие техногенной трещиноватости способствует проникновению низкокачественных вод из более глубоких горизонтов. Это включает отжатие минерализованных поровых растворов из слабопроницаемых толщ и блоков, а также переток загрязнённых вод через незатампонированные скважины.

Дополнительным источником загрязнения подземных вод служат отвалы вскрышных и породных материалов. При взаимодействии с атмосферной влагой в этих отвалах происходит выщелачивание

растворимых минералов, в результате чего формируются инфильтрационные потоки, насыщенные различными химическими компонентами-загрязнителями, проникающими в водоносные горизонты.

Таким образом, загрязнение подземных вод представляет собой деградацию их природного качества физического, химического, биологического и органолептического состава то ведёт к существенному экологическому, социальному и экономическому ущербу.

Типы источников загрязнения подземных вод и их характеристика.

По характеру источника загрязнения подземных вод выделяют:

1. Поверхностные источники, в подавляющем большинстве случаев техногенного происхождения, располагаются на удалении от активных зон разгрузки подземных вод, при этом их объемы часто существенно превышают мощность водоносного комплекса. Это способствует распространению загрязняющих веществ в условиях плановой (горизонтальной) фильтрации. Данный тип источников характеризуется длительной латентной (скрытой) фазой загрязнения, в течение которой загрязняющие вещества не проявляются в составе дренажных вод, отбираемых в водозаборных сооружениях. Основная масса загрязнений, как правило, проникает на незначительные глубины, а степень их воздействия в значительной мере зависит от защитных свойств природных покровных отложений или техногенных насыпей.

2. Подземные бассейны некондиционных вод преимущественно имеют естественное происхождение, хотя в некоторых случаях их формирование может быть обусловлено техногенными воздействиями — в частности, растворением горных пород под влиянием изменённой физико-химической обстановки в водоносных горизонтах. Эти бассейны, как правило, располагаются на значительной глубине по отношению к исходному уровню подземных вод. В редких случаях образование некондиционных вод может быть связано с естественной плановой гидрохимической зональностью внутри водоносного пласта.

Во всех вариантах ключевым фактором, определяющим вероятность и степень загрязнения подземных вод, является режим водоотбора. Так называемая “скрытая” фаза загрязнения может быть относительно краткосрочной, если она ограничивается периодом подтягивания некондиционных вод из глубинных частей пласта. Однако поступление таких вод из слабопроницаемых межпластовых толщ в эксплуатируемый горизонт может проявиться лишь спустя длительное время после начала дренажных или водоотборных работ.

По степени гидродинамического влияния на подземные воды среди поверхностных источников загрязнения выделяют:

- Гидродинамически активные источники;
- Гидродинамически пассивные источники.

Классификация основана на характере изменений, которые данные источники вызывают в структуре естественного подземного потока. Ключевым параметром, определяющим тип источника, является соотношение между расходом утечек загрязнённых (промышленных) стоков из техногенных бассейнов и величиной естественного фильтрационного потока в зоне воздействия. Это соотношение определяет степень смешения техногенных и природных (пластовых) вод, а также скорость и масштаб распространения загрязнения.

Причины, условия и последствия прорывов воды при строительстве подземных сооружений.

Прорыв воды является одним из наиболее опасных видов фильтрационных деформаций, часто возникающих при строительстве подземных сооружений в относительно водоупорных породах при несниженных напорах в соседних водоносных горизонтах. В результате таких прорывов нередко оказываются затопленными или заполненными суспензиями километры подземных выработок.

Прорывы воды представляют собой катастрофическое явление, приводящее к затоплению, заиливанию или запесочиванию подземных сооружений, потере горной техники и выводу из строя на длительный срок отдельных участков объекта.

Основные причины возникновения прорывов:

• недостаточный объём дренажных работ по осушению водоносных пород в пределах зоны выемки;

• нарушение технологических режимов строительства (например, обрушение пород в незакреплённой части выработки, несвоевременное бурение дренажных скважин, запуск сооружения в эксплуатацию до завершения осушения участков);

• неблагоприятный геологический разрез и литологический состав пород (преобладание мощных слоёв песчаников, известняков, отсутствие водоупорных глинистых прослоев);

• внезапное вскрытие геологических нарушений, зон, в которых отсутствует сплошность водоупорных слоёв;

• низкая устойчивость пород на горизонте, где проводится подработка, особенно при малой глубине залегания водоносного объекта и крупных обрушениях;

• недостаточная кратность подработки (отношение глубины подработки к мощности выемочного пласта);

• малая мощность покровных отложений, перекрывающих водопроводящие слои;

• обнажение коренных водопроводящих пород (песчаников, песчанистых сланцев, известняков) в пределах чаши водохранилища;

• наличие в районе водохранилища разведочных скважин, старых шурфов, сбойных выработок, провалов поверхности и других элементов, обеспечивающих гидравлическую связь с подземным сооружением.

Оценка вероятности прорывов воды в подземные сооружения предполагает выявление прямой или косвенной связи между подземными выработками и существующими источниками воды. Такая связь может быть естественной либо вызвана фильтрационными деформациями и нарушениями сплошности экранирующих пород под воздействием гидростатического и горного давления.

Однако при горно-строительных работах в толще песчано-глинистых пород с частичным или полным обрушением кровли выработок прорывы воды могут быть связаны с комплексными гидрогеомеханическими процессами в подработанном массиве — так называемыми наведёнными сдвижениями, которые можно условно разделить на три основные группы (рис.1).

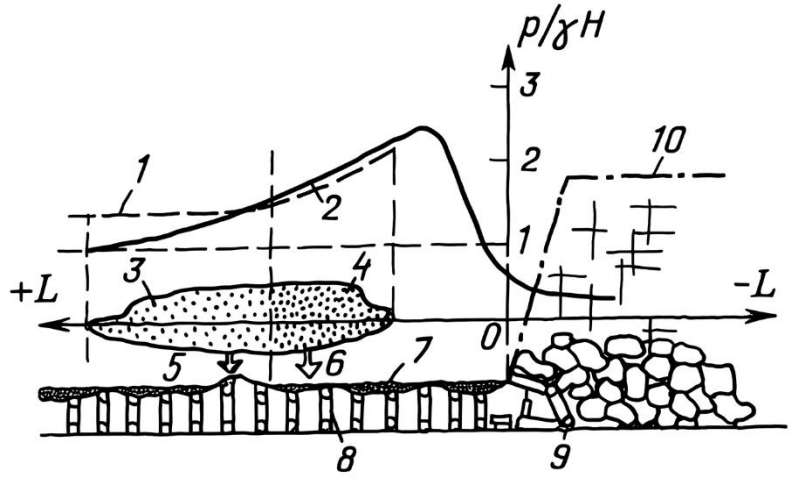


Рис. 1. Схема нагружения линзы пористых пород в зоне опорного давления: 1— график изменения порового давления в линзе пористых пород; 2 — зависимость опорного давления p от расстояния L до забоя на глубине H; 3 — зона пород, временно находящаяся в состоянии упругого сжатия; 4 — зона пород с нарушенной структурой; 5, 6 — участки возможного прорыва соответственно разжиженной породы или воды с частичным выносом материала из слабосцементированных пород в зонах

ослабления кровли выработки; 7 — кровля пласта; 8 — выработка (подготовительная); 9 — очистной забой; 10 — граница зоны трещин в кровле выработанного пространства.

Структура водных ресурсов и источники питания речной сети Кыргызстана.

Территория Кыргызстана расположена между высотами 401 и 7739 м над уровнем моря (пик Победы). 40,3 % площади страны находится на высоте 3000 м и выше. Горный рельеф обусловил формирование разветвленной речной сети, здесь насчитывается около 5 тыс. рек, которые относятся к восьми гидрологическим бассейнам — рек Сыр-Дарья, Аму-Дарья, Чу, Талас, Или (Кар-Кыра), Тарим и бессточных озер Иссык-Куль и Чатыркуль. Основным источником, пополняющим водные ресурсы, являются осадки, на количество которых, как и в других горных странах, значительное влияние оказывает лесистость горных склонов, состояние ледниковых и лесных экосистем. Ледники Тянь-Шаня и Памиро-Алая для многих рек являются основным источником питания. Наибольшее число рек (до 46 %) характеризуется ледниково-снеговым типом питания, около 43 % рек имеют снеговоледниковое питание, значительно меньше рек снегового питания (10 %), еще меньше рек имеющих снегово-дождевое питание. Доля ледниковых вод в годовом объеме стока меняется от 5,9 % у р. Сыр-Дарьи и достигает 48,9 % у р. Сары-Джаз. Почти все реки в той или иной мере получают дополнительное питание за счет разгрузки подземных вод (рис.2).

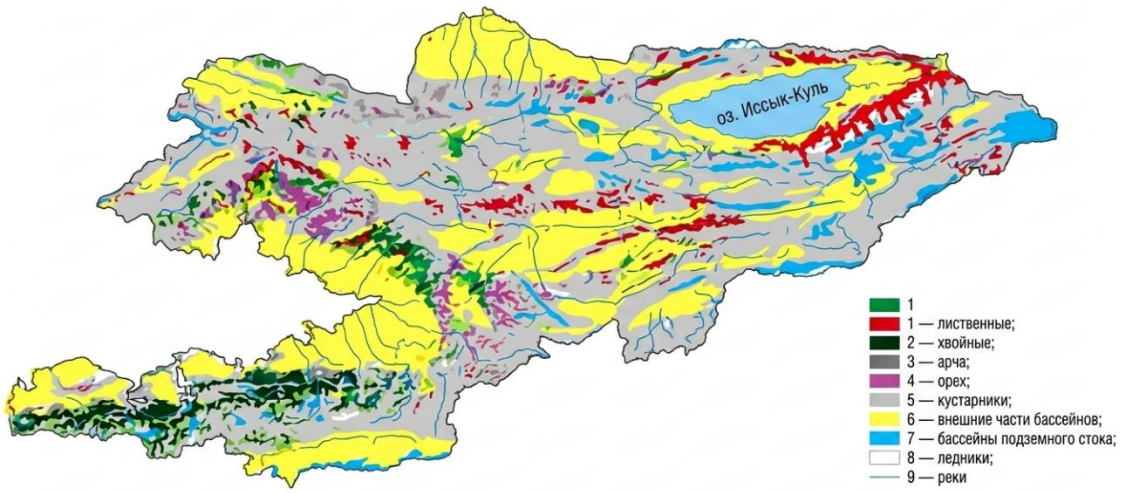


Рис.2. Схематическая карта бассейнов подземного стока Кыргызстана с основными экосистемами.

Формирование и распространение загрязнения вод при подземной разработке высокогорных месторождений.

Подземное строительство на высокогорных месторождениях Кыргызстана сопровождается рядом экологических рисков, среди которых особую обеспокоенность вызывает загрязнение подземных и поверхностных вод. В условиях высокогорья, где гидрогеологические системы обладают высокой чувствительностью к техногенным воздействиям, нарушения естественного режима водообмена происходят особенно быстро и с трудно обратимыми последствиями.

На месторождениях, таких как Кумтор, Джеруй, Талды-Булак Левобережный и других, строительные и эксплуатационные процессы сопровождаются вскрытием водоносных горизонтов, образованием техногенных дренажей, утечками промышленных вод, а также разрушением ледниковых и наледных систем. В таких зонах наблюдается изменение химического состава подземных вод вследствие инфильтрации сточных растворов, насыщенных тяжелыми металлами (например, мышьяком, свинцом, ртутью), а также строительными реагентами и нефтепродуктами.

Дополнительно загрязнение усугубляется нестабильностью геологических пород, активным выщелачиванием вскрышных материалов и высокой скоростью фильтрации в зонах трещиноватости. Наличие ледников и сезонных потоков способствует ускоренному переносу загрязняющих веществ в нижележащие долины, где формируются источники питьевого и орошательного водоснабжения. Учитывая ограниченные запасы пресных вод в высокогорных районах Кыргызстана, проблема техногенного загрязнения требует комплексного мониторинга, оценки степени риска и внедрения современных методов защиты и восстановления водной среды (таблица 1).

Таблица 1

№	Место-рождение	Основные загрязня-ющие вещества	Источники загрязнения	Потенци-альное воздействие на водные ресурсы
1	Кумтор	Мышьяк, ртуть, свинец, сульфаты, нефтепродукты	Хвостохранили ща, вскрышные породы, дренажные воды	Загрязнение рек и подземных вод, нарушение ледникового баланса

2	Джеруй	Цианиды, тяжелые металлы, строительные реагенты	Подземные выработки, хвостохранилища	Загрязнение подземных вод, риск для питьевого водоснабжения
3	Талды-Булак Левобережный	Сульфаты, железо, марганец, нефтепродукты	Дренажные воды, утечки из технологических трубопроводов	Загрязнение поверхностных вод, ухудшение качества воды
4	Тоголок	Тяжелые металлы, строительные материалы	Подземные разработки, строительные площадки	Загрязнение подземных вод, влияние на близлежащие водоёмы

Мониторинг и инженерная защита подземных вод от загрязнения.

Основой инженерной защиты подземных вод от загрязнения является мониторинг подземных вод.

Мониторинг подземных вод представляет собой часть более широкой системы — экологического мониторинга. В рамках этой системы используются следующие методы:

1. Аналитический метод — определение химического состава и свойств проб газообразной и водной среды с помощью инструментальных или лабораторных устройств и приборов.
2. Биоиндикационный метод — оценка интегральных характеристик состояния воздуха, воды и почвы по реакциям растительных и животных сообществ.
3. Гидрогеологический метод — исследование элементов и параметров естественных или искусственно нарушенных фильтрационных полей.
4. Геофизический метод — позволяет оценивать влажность, минерализацию, напряжённое состояние, направление движения подземных вод и состояние искусственных грунтов.
5. Дистанционный метод — основан на интерпретации и дешифрировании аэро- и космических снимков для выявления изменений в природной среде.

В системе мониторинга подземных вод выделяют три основных метода управления их состоянием: охрана, защита и реабилитация.

Охрана подземных вод — это комплекс запретительных и разрешительных мер, направленных на предотвращение негативных изменений количественных и качественных характеристик подземных вод.

Примером такой деятельности является установление зон и округов санитарной охраны водозаборов. Для их проектирования используются соответствующие нормативно-методические документы (СНиПы, СанПиНы и др.).

Защита подземных вод предполагает комплекс инженерных мероприятий, направленных на ограничение во времени и пространстве негативного воздействия инженерных сооружений и/или хозяйственной деятельности на подземные воды и другие компоненты экосистемы.

Наиболее распространённые меры защиты включают:

- искусственное пополнение запасов подземных вод в целях предотвращения их истощения;
- изоляцию потенциальных или действующих источников загрязнения с использованием экранов, завес, дренажей и других конструкций;
- локализацию пятен загрязнения с помощью отвлекающих водозаборов, противофильтрационных завес, барьеров, грунтовых стен и др.

Реабилитация подземных вод — это восстановление их экологически приемлемых свойств и качеств (вместе с другими компонентами природной среды).

Для этого применяются меры профилактики в сочетании с инженерными, биологическими, химическими и социальными средствами.

Примером реабилитации может служить очистка водоносных горизонтов и зоны аэрации от нефтепродуктов с использованием специализированных культур микроорганизмов.

Все методы инженерной защиты подземных вод от загрязнения условно делятся на две группы:

1. Профилактические — направлены на предотвращение загрязнения.
2. Активные — предназначены для ограничения или ликвидации уже возникшего загрязнения.

Применение методов мониторинга подземных и поверхностных вод на горнорудных месторождениях Кыргызстана.

На горнорудных месторождениях Кыргызстана применяется комплексный подход к мониторингу подземных и поверхностных вод, включающий различные методы оценки состояния водной среды. Одним из основных является аналитический метод, при котором на месторождении Кумтор регулярно отбираются пробы дренажных и поверхностных вод. Эти образцы исследуются в лабораторных условиях на содержание тяжёлых металлов (ртуть, свинец, мышьяк), цианидов и нефтепродуктов. Полученные данные позволяют своевременно выявлять отклонения от предельно допустимых концентраций и оперативно реагировать на угрозу загрязнения.

Дополняет его биоиндикационный метод, который активно используется в окрестностях месторождения Джеруй. Здесь наблюдают за изменениями в структуре и численности сообществ флоры и фауны. Например, снижение численности макрозообентоса или ухудшение состояния водной растительности может свидетельствовать о нарушении гидрохимического равновесия и наличии загрязнений.

Гидрогеологический метод широко применяется на месторождении Талды-Булак Левобережный, где осуществляется регулярный контроль уровня подземных вод в специально оборудованных скважинах. Особое внимание уделяется зонам вблизи карьеров и хвостохранилищ, где наблюдается активная фильтрация в естественных и нарушенных геологических структурах. Эти данные позволяют оценить риски проникновения загрязнённых вод в водоносные горизонты.

Дистанционный метод активно применяется в районе Кумтора и ледников Петрова. С помощью анализа спутниковых снимков отслеживаются изменения ледниковых масс, движение наледей и сезонные колебания стока. Это помогает прогнозировать риски загрязнения, связанные с таянием ледников, а также выявлять нелегальные водоотводы и скопления потенциально опасных веществ на поверхности.

Вывод. Несмотря на значительные экологические риски, сопровождающие подземное строительство на горнорудных месторождениях Кыргызстана, в стране формируется комплексная система инженерной и экологической защиты подземных вод. Применение современных методов экологического мониторинга, включая аналитические, гидрогеологические, биоиндикационные, геофизические и дистанционные подходы, обеспечивает своевременное выявление негативных изменений водной среды, прогнозирование их развития и обоснованное принятие природоохранных решений.

Реализация профилактических и активных мероприятий по защите и восстановлению подземных вод способствует снижению техногенной нагрузки на гидрогеологические системы и сохранению устойчивости горных экосистем. Данный подход отражает переход к экологически ориентированному природопользованию и формирует научно обоснованную основу для устойчивого развития горнодобывающей отрасли с учетом долгосрочных экологических последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н. и др. Шахтное и подземное строительство.–М.: Изд-во Академии горных наук, 2001.- Том II.-582 с.: ISBN 5-7892-0080-X.
2. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом Кыргызской Республики. – Бишкек, 2025.
3. Zaginaev V. V. et al. Monitoring the Development of Potential Hazardous Mountain Lakes Using Remote Sensing in the Kyrgyz Republic. International Journal of Geoinformatics, 2024.
4. Piroton V., Havenith H.-B. National Inventory of Glacial Lakes in Kyrgyzstan: Integrating Remote Sensing for Hazard Assessment and Monitoring. EGU General Assembly, 2025.
5. Van Tricht L. et al. Reconstruction of glacier mass balance in the Tien Shan, Kyrgyzstan. Frontiers in Earth Science, 2021.
6. EGUsphere. High-resolution mapping of glacial lake expansion in Kyrgyzstan (2016–2024) using Sentinel-2 imagery, 2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Исаков Куттубек Исакович, к.т.н., и.о. профессор кафедры Организация перевозок и управление транспортом КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: k.isakov@kstu.kg;
2. Осмонов Керимбек Тентиевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры Прикладная информатика КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: osmonovkt@mail.ru;
3. Алтыбаев Аманбек Шаршенбекович, к.т.н., доц., зав. кафедрой Организация перевозок и управление транспортом КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: a.altybaev@kstu.kg;
4. Керимбаева Сабира Абдыралиевна, научный сотрудник ГБНИР, КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: sabira500@mail.ru;
5. Мурадилов Рысбек Мурадилович, магистрант кафедры ПМИ КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: rysbek.muradilov@gmail.com;
6. Бийбосунов Болотбек Ильясович, доктор физико-математических наук, доктор технических наук, профессор Кыргызского государственного университета имени И. Арабаева, e-mail: bbolotbek@mail.ru
7. Халмуратов Бегалы Оразалиевич, докторант Кыргызского государственного университета им. И. Арабаева, e-mail: begaly.khalmuratov@mail.ru;
8. Исагалиева С.У., научный сотрудник Института машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, e-mail: isagalieva3103@mail.ru;
9. Мейманбек к Айзирек, магистрант Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, e-mail: zzzirekk@gmail.com;
10. Сабитов Баратбек Рахманович, д.ф.-м.н. профессор Кыргызского национального университета им. Ж. Баласагына, e-mail: sabitov@kstu.kg;
11. Шейшенов Жамин Орозобекович, кандидат технических наук, директор филиала Казахского Yационального университета им. Аль Фараби, Кыргызский национальный университет имени Ж. Баласагына, e-mail: Jaminsoran@mail.ru;

12. Мусалиева Сезим Кубанычбековна, магистрант кафендры Прикладная информатика КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: smusalieva@kstu.kg;
13. Матраимов Сардар Кубанович, магистрант кафендры Прикладная информатика КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: sardarkmpiemz@kstu.kg;
14. Орозобекова Аида Кубанычбековна, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Прикладная информатика», КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: oakk43@gmail.com.
15. Батыркулова Аймээрим Абдырахмановна, магистрант кафедры «Прикладная информатика» КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: mekoo.ru@gmail.com
16. Болотова Айгерим Болотовна, магистрант кафедры «Прикладная информатика» КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: abolotova@kstu.kg;
17. Нурласова Сайнап Нурласовна, магистрант кафедры «Прикладная информатика» КГТУ им. И. Раззакова, e-mail: snurlasova@kstu.kg;

Требования по оформлению статей для публикации в журнале «Современные проблемы механики»

1. Статья представляется на бумажном носителе и в электронном виде. Название файла должно соответствовать фамилии первого автора. Бумажная копия должна быть подписана всеми авторами.
2. Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word 2021, формат А4 (книжный). Поля: все по 20мм. Межстрочный интервал – одинарный. Шрифт Arial. Размер кегля (символов) – 14 пт. Рекомендуемый объем статьи 4-10 страниц.
3. Публикуемая в журнале статья должна состоять из следующих последовательно расположенных элементов:

– шифр УДК – слева, обычный шрифт;
– заголовок (название) статьи – по центру, шрифт полужирный, буквы – прописные (на русском, кыргызском и английском языках);
– фамилия и инициалы автора(ов) – по центру, полужирный шрифт (на русском, кыргызском и английском языках);
– место работы – по центру, обычный шрифт (на русском, на кыргызском и на англ яз);
– аннотация (на кыргызском, русском и английском языках) до 6 строк и ключевые слова (5-10 слов);
– текст статьи. Рисунки (графики) и таблицы должны располагаться по тесту после ссылки на него. Сокращения и условные обозначения допускаются только принятые в международной системе единиц сокращения мер, физических, химических и математических величин, терминов и т.п. Набор формул осуществляется в тексте только в редакторе Math Type.
– список литературы. Список цитируемой литературы приводится в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание.

Общие требования и правила составления. В списке источники располагаются в порядке их упоминания в статье. Отсылки в тексте статьи заключают в квадратные скобки, например: [5]. Элементы статьи отделяются друг от друга одной пустой строкой.

На отдельной странице предоставляются сведения об авторе (ах), которые содержат данные:

-фамилия, имя, отчество полностью;

-ученая степень, ученое звание;

-место адрес работы, занимаемая должность;

-контактный телефон (рабочий, домашний, сотовый), e-mail.

4. Статья должна иметь четкие структурные части: введение (вводная часть, постановка проблемы), методика решения (исследования) проблемы, результаты исследований, выводы (заключительная часть) и список литературы.
5. Рекомендуется дать ссылки в разделе «Литература» на статьи, выпущенные в предыдущих номерах «Журнала «Современные проблемы механики сплошных сред»;
6. Не рекомендуется в одной статье дать подстраничную ссылку и общую послетекстовую ссылку, оптимально последнее.
7. Не рекомендуется в одной статье большое количество авторов (5-7 и более). Оптимально один автор или 3 автора в одной статье.
8. Не рекомендуется текст статьи с объемом менее 5 стр., такие статьи не будут считаться статьями и при размещении на сайт НЭБ будут относиться к сообщениям.
9. Проверить статью на антиплагиат. https://text.ru/antiplagiat.

СОДЕРЖАНИЕ

		стр
1.	Исаков К.И., Осмонов К.Т., Алтыбаев А.Ш., Керимбаева С.А., Мурадилов Р.М. КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	3
2.	Бийбосунов Б. И., Халмуратов Б. О. ЭТАЛОННЫЙ КЛАССИФИКАТОР НА БИНАРНЫХ МАТРИЦАХ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНЫХ СИМВОЛОВ КЫРГЫЗСКОГО АЛФАВИТА.....	23
3.	Исагалиева С.У., Мейманбек к. А. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «ДЖЕРУЙ».....	32
4.	Сабитов Б.Р., Шейшенов Ж., Мусалиева С.К., Матраимов С.К. ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ.....	46
5.	Орозобекова А.К., Батыркулова А.А. РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ СКЛОНОВ КЫРГЫЗСТАНА.....	58
6.	Осмонов К.Т., Болотова А.Б., Нурласова С.Н. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАДАЧИ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ В ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ	69
7.	Исагалиева С.У., Мейманбек к. А. АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРИ ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ.....	85
8.	СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ……	97
9.	ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ	99
10.	СОДЕРЖАНИЕ (на русском, кыргызском и английском языках)	101

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ
Выпуск шестьдесят четвертый (2), 2026 г.

МАЗМУНУ

		бет
1.	Исаков К.И., Осмонов К.Т., Алтыбаев А.Ш., Керимбаева С.А., Мурадилов Р.М. КВАЗИСЫЗЫКТУУ ДИФФРЕНЦИАЛДЫК ТЕҢДЕМЕЛЕР СИСТЕМАСЫН КОЛДОНУУ МЕНЕН МЕХАНИКАНЫН МАСЕЛЕЛЕРИН ЧЕЧҮҮДӨГҮ КОМПЬЮТЕРДИК ИШТЕТҮҮЛӨР.....	3
2.	Бийбосунов Б. И., Халмуратов Б. О. КЫРГЫЗ АЛФАВИТИНИН КОЛ ЖАЗМА СИМВОЛДОРУН ТААНУУ МАСЕЛЕСИНДЕ БИНАРДЫК МАТРИЦАЛАРДАГЫ ЭТАЛОНДУК КЛАССИФИКАТОР.....	23
3.	Исагалиева С.У., Мейманбек к. А. “ЖЕРҮЙ” КЕНИНИН ШАРТЫНДА ТОО-КАЗЫЛМАЛАРЫН ЖЕЛДЕТҮҮНҮН РАЦИОНАЛДУУ ЫКМАСЫН ТАНДОО.....	32
4.	Сабитов Б.Р., Шейшенов Ж., Мусалиева С.К., Матраимов С.К. МАШИНА ЖАНА ТЕРЕҢ ОКУТУУГА НЕГИЗДЕЛГЕН СУУ РЕСУРСТАРЫНЫН МАСЕЛЕЛЕРИН ОПТИМАЛДАШТЫРУУ ЖАНА МОДЕЛДӨӨ.....	46
5.	Орозобекова А.К., Батыркулова А.А. КЫРГЫЗСТАНДАГЫ ТОО ЖАҢГАКТАРЫНЫН ТУРУКТУУЛУГУН ЭСЕПТӨӨ ҮЧҮН МОБИЛДИК ТИРКЕМЕНИ ИШТЕП ЧЫГУУ.....	58
6.	Осмонов К.Т., Болотова А.Б., Нурласова С.Н. АЧЫК КАНАЛДАРДАГЫ СУЮКТУКТАРДЫ ТРАНСПОРТТООДОГУ ЖОГОТУУЛАРДЫ МИНИМАЛДАШТЫРУУ ҮЧҮН МАСЕЛЕНИ ИЗИЛДӨӨНҮН ИНФОРМАЦИЯЛЫК ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ.....	69
7.	Исагалиева С.У., Мейманбек к. А. БИЙИК ТООЛУ ШАРТТАРДА ЖЕР АЛДЫНДАГЫ КУРУЛУШТАРДЫ ЖҮРГҮЗҮҮДӨ ЖЕР АСТЫНДАГЫ СУУЛАРДЫН ЖАНА ЖЕР ҮСТҮНДӨГҮ СУУНУН БУЛГАНЫШЫН ТАЛДОО.....	85
8.	АВТОРЛОР ТУУРАЛУУ МААЛЫМАТ.....	97
9.	ЖУРНАЛГА ЖАРЫЯЛОО ҮЧҮН ДОКУМЕНТТЕРГЕ ТАЛАПТАР.....	99
10.	МАЗМУНУ (кыргыз, орус жана англис тилдеринде)……..	101

CONTENTS

1.	Isakov K.I., Osmonov K.T., Altybaev A.Sh, Kerimbaeva S.A., Muradilov R.M. COMPUTER PROCESSING IN SOLVING MECHANICS PROBLEMS USING QUASI-LINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS.....	3
2.	Biibosunov B. I., Khalmuratov B. O.A TEMPLATE CLASSIFIER ON BINARY MATRICES FOR HANDWRITTEN CHARACTER RECOGNITION OF THE KYRGYZ ALPHABET.....	23
3.	Isagalieva S.U., Meimanbek k. A. RATIONALE FOR THE CHOICE OF A RATIONAL METHOD OF VENTILATION OF MINING WORKINGS IN THE CONDITIONS OF THE “JEROOY” MINE.....	32
4.	Sabitov B.R., Sheishenov Zh., Musalieva S.K., S.K. Matraimov OPTIMIZATION AND MODELING OF WATER RESOURCE PROBLEMS BASED ON MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING.....	46
5.	Orozobekova A.K., Batyrkulova A.A. DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR CALCULATING THE STABILITY OF MOUNTAIN SLOPES IN KYRGYZSTAN.....	58
6.	Osmonov K.T., Bolotova A.B., Nurlasova S.N. INFORMATION TECHNOLOGIES: RESEARCH PROBLEMS FOR MINIMIZING LOSSES IN FLUID TRANSPORTATION IN OPEN CHANNELS.....	69
7.	Isagalieva S.U., Meimanbek k. A. ANALYSIS OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER POLLUTION DURING UNDERGROUND CONSTRUCTION IN HIGH-ALTITUDE CONDITIONS.....	85
8.	INFORMATION ABOUT AUTHORS……	97
9.	REQUIREMENTS FOR PAPERS FOR PUBLICATION……	99
10.	CONTENTS (in russian, kyrgyz and english languages).....	101

Подписано к печати 29.06.2026 г.
Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Объем 13,0 п.л.
Тираж 200 экз

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Учебно-издательский центр «Авангард»
720020, г. Бишкек, ул. Малдыбаева, 34 б

ISSN 1694-6065

