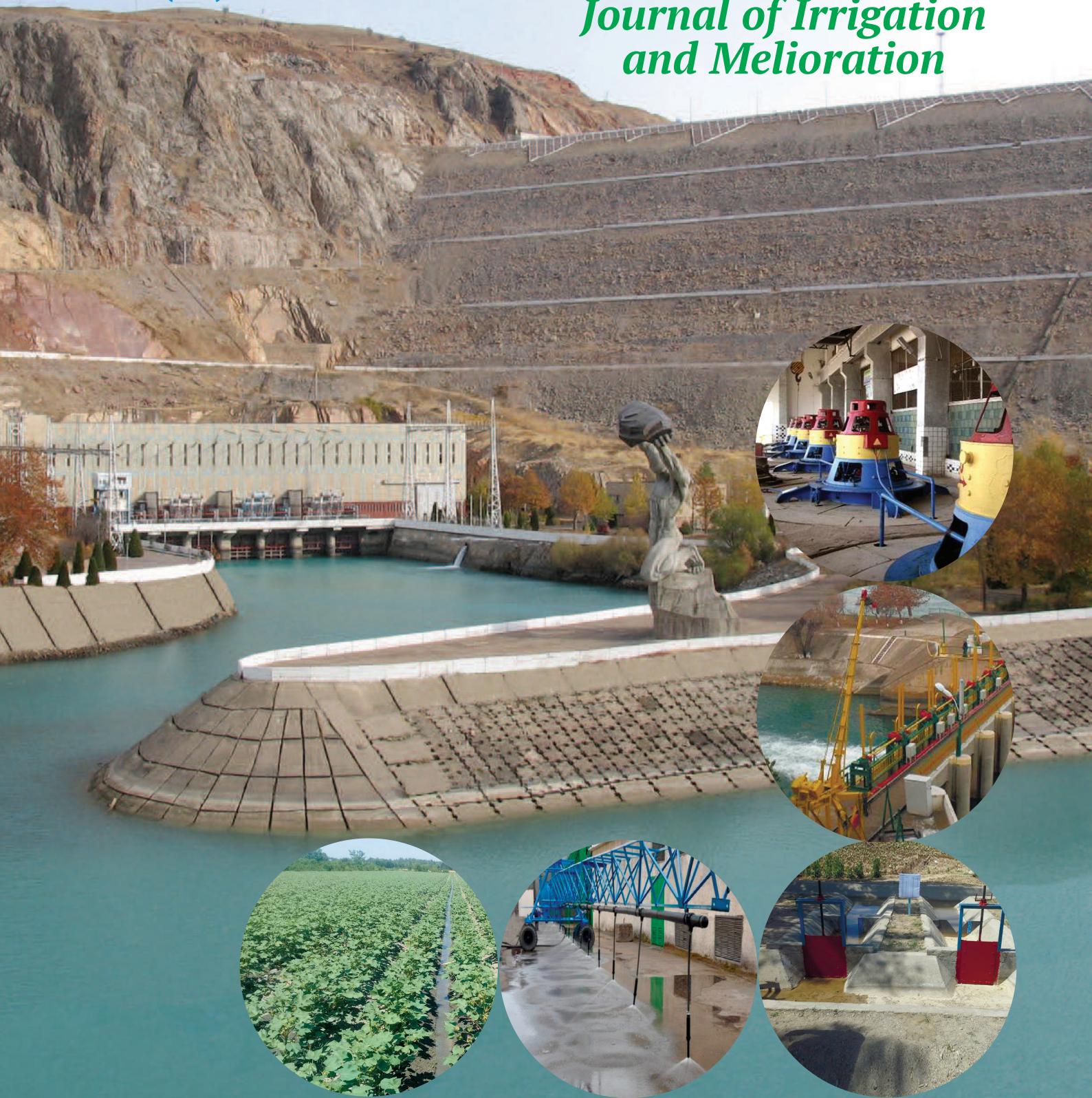


IRRIGATSIYA va MELIORATSIYA

Nº1(27).2022

*Journal of Irrigation
and Melioration*



ИРРИГАЦИЯ ВА МЕЛИОРАЦИЯ

М.Х.Хамидов, И.А.Бегматов Глобал иқлим ўзгариши ва сұғорма дәхқончилик.....	6
А.Т.Салохиддинов, А.Г.Савицкий, О.А.Аширова Исследования консервативной конечно-разностной схемы для уравнений переноса.....	13
И.Т.Карабаев, А.У.Ахмадалиев Түрли техника воситалари ёрдамида ишлов беришни тупроқнинг агрофизик ва сув-физик хоссалари ҳамда экинлар ҳосилдорлигига таъсири.....	18

ГИДРОТЕХНИКА ИНШООТЛАРИ ВА НАСОС СТАНЦИЯЛАР

T.Majidov, N.Ikramov Channel forms movement and bottom sediment consumption in the Tuymuyun hydraulic engineering complex lower reaches.....	23
А.А.Яңғиев, Ф.А.Гаппаров, Ш.Н.Азизов, Д.С.Аджимуратов Томчилатиб суғориш технологиясида сув тиндиригич иншоотларининг мақбул параметрларини танлаш бўйича тавсиялар (Амударё ҳавзаси мисолида).....	27
А.М.Арифжанов, Д.Е.Атакулов Ўзан морфометрик параметрларини баҳолашда ГАТ технологиялар.....	32
А.А.Яңғиев, Ф.А.Гаппаров, Ш.Н.Азизов, Д.С.Аджимуратов, Ш. Панжиев Қашқадарё вилоятидаги "Лангар" ва "Қалқама" сел-сув омборларидағи лойқа-чўқиндиларнинг физик-кимёвий таркиби таҳлили натижалари.....	37
Х.М.Комилова Моделирование колебательных процессов композиционных трубопроводов с учетом оснований пастернака.....	42

ҚИШЛОҚ ХЎЖАЛИГИНИ МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ

A.Tukhtakuziev, M.T.Mansurov, N.T.Nabikhujaeva The study of uniformity of the course of a wide-cut chisel-cultivator in terms of the depth of processing.....	49
Б.П.Шаймарданов Разработка технических средств для укладки поливного шланга капельного орошения при гребневом выращивании хлопчатника.....	55
А.Парпиев, К.Онарқулов, F.Рахматов Чигитли пахтани функционал керамика асосидаги инфрақизил қуритишнинг сифат кўрсаткичлари таҳлили.....	60

СУВ ХЎЖАЛИГИ ИҚТИСОДИ ВА ЕР РЕСУРСЛАРИДАН ФОЙДАЛАНИШ

Kh.A.Pardaev Assessment of economic relations between actors of the tomato production chain.....	64
А.А.Хаджимуратов Мамлакатимиз ҳудудида ирригация соҳасида тадбиркорликнинг шаклланиши тарихи.....	70
У.Х.Нигмаджанов Востребованность кардинальных перемен в развитии сельского хозяйства Узбекистана и его причины.....	78
И.Б.Рустамова Аграр соҳада инновацияларни жорий этиш ва фойдаланиш масалалари.....	84

ИРРИГАЦИЯ ВА МЕЛИОРАЦИЯ СОҲАСИДА АМАЛГА ОШИРИЛАЁТГАН ИСЛОҲОТЛАР

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йил 10 декабрдаги "Иқтисодиёт тармоқлари учун муҳандис кадрларни тайёрлаш тизимини инновация ва рақамлаштириш асосида тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида"ги ПҚ-42-сонли қарори...	89
---	----

УДК: 551.5:517.962

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСЕРВАТИВНОЙ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕНОСА

А.Т.Салохиддинов – д.т.н., профессор, А.Г.Савицкий – к.т.н., О.А.Аширова – PhD

Национальный исследовательский университет “Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства”

Аннотация

Исследования проведены для общезвестных и наиболее широко применяемых конечно-разностных аналогов конвективных слагаемых уравнения переноса вещества. В статье показаны ситуации, в которых нарушается консерватизм при расчете теоретически консервативных уравнений переноса вещества. Предложена новая консервативная конечно-разностная схема для конвективных слагаемых уравнения переноса. Предлагаемая к использованию конечно-разностная схема не теряет своей консервативности в двигающемся газе или жидкости, при различных возможных распределениях скоростей. Проведены тестовые расчеты, показывающие преимущества новой схемы по сравнению с общезвестными схемами расчета. Данная статья написана таким образом, что любой читающий ее смог бы повторить все расчеты самостоятельно, чтобы удостовериться в том, что все описанное и сказанное в этой статье представлено точно и без искажений. Показано, что при использовании самых известных и повсеместно используемых конечно-разностных схем направленных разностей, могут и возникают условия, при которых теряется консерватизм при решении уравнений описывающих фундаментальные законы Сохранения вещества. В статье предлагается новая консервативная конечно-разностная схема к аэрогидродинамическим расчетам, при использовании конечно-разностных методов.

Ключевые слова: частная производная, консерватизм расчета, перенос вещества, схемная вязкость, конечно-разности, численное решение, устойчивость.

КЎЧИРИШ ТЕНГЛАМАЛАРИ УЧУН КОНСЕРВАТИВ ЧЕКЛИ-АЙИРМА СХЕМАСИ

А.Т.Салохиддинов – т.ф.д., профессор, А.Г.Савицкий – т.ф.н., О.А.Аширова – PhD

*“Ташкент ирригация ва қишлоқ ҳўжалигини механизациялаш мұхандислари институты”**Миллий тадқиқот университети*

Аннотация

Тадқиқотлар моддани кўчириш тенгламасининг умуммалуум ва энг кўп қўлланиладиган конвектив кўшилувчилари-нинг чекли-айирма аналоглари мисолида бажарилган. Мақолада моддаларни ўтказишнинг назарий консерватив тенгламаларни хисоблаш жараёнида уларнинг консерватизми бузилиш ҳолатлари кўрсатилган. Моддани кўчириш тенгламасининг конвектив кўшилувчилари учун янги, мутлақо консерватив чекли-айирма схемаси тавсия қилинган. Фойдаланиш учун тавсия қилинган чекли-айирма схемаси ҳаракатланувчи газ ёки суюклида, тезликнинг мумкин бўлган тақсимотида ўзининг консерватизмини йўқотмайди. Бажарилган тест режимидаги хисоблар асосида янги схеманинг бугунги кунда мавжуд ва маълум бўлган хисоблаш схемалари билан солишитирсанда афзаллilikларга эга эканлиги аниқланди. Ушбу мақола, ўқувчига хисоб-китобларни мустақил тақрорлаш асосида барча олинган натижаларнинг тўғрилигига ишонч ҳосил қилиш имконини беради. Тадқиқотлар натижасида бугунги кунда маълум бўлган ва кенг қўлланиладиган йўналтирилган чекли-айирма схемаларидан фойдаланганда модданинг сақланиши қонунларини тавсифловчи асосий тенгламаларни ечишда консерватизмнинг йўқолиши ҳолати юзага келиши мумкинлиги аниқланди. Мақолада тадқиқотлар натижасида чекли-айирма усулларидан фойдаланган ҳолда аэрогидродинамик хисоблар учун олинган янги, мутлақо консерватив чекли-айирма схемаси тавсия қилинган.

Таянч сўзлар: қисман ҳосила, хисоблаш консерватизми, модданинг кўчирилиши, схема ёпишқоқлиги, чекли-айирмалар, сонли ечим, барқарорлик.

STUDY OF A CONSERVATIVE FINITE-DIFFERENCE SCHEME FOR TRANSFER EQUATIONS

A.T.Salokhiddinov – DSc, professor, A.G.Savitsky – c.t.s., O.A.Ashirova – PhD

“Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers” National Research University

Abstract

The study has been carried out for the well-known and most widely used finite-difference analogs of convective terms of the substance transfer equation. The article shows situations in which the conservatism of calculating theoretically conservative equations of matter transfer is violated. A new, absolutely conservative finite-difference scheme for convective terms of the transport equation is proposed. The finite-difference scheme proposed for use does not lose its conservativeness in a moving gas or liquid under any possible velocity distributions. Test calculations have been carried out, showing the advantages of the new scheme in comparison with well-known calculation schemes. This article is written so that anyone reading it can repeat all the calculations themselves to make sure that everything described and said in this article is presented accurately and without distortion. It is shown that when using the most well-known and widely used finite-difference schemes of directional differences, conditions may arise under which conservatism is lost when solving equations describing the fundamental laws of conservation of matter. The article proposes a new, absolutely conservative finite difference scheme for aerohydrodynamic calculations using finite difference methods.

Key words: partial derivative, calculation conservatism, matter transfer, scheme viscosity, finite differences, numerical solution, stability.



Введение. Уравнение переноса вещества в пространстве неотъемлемая часть подавляющего большинства математических моделей аэрогидродинамики. Это задачи прогноза погоды [1, 2, 3], расчета водного обмена в морях [4, 5] и океанах [6, 7, 8], переноса и распространения загрязняющих веществ в атмосфере и поверхностных водных объектах.

Для одномерного пространственного случая, уравнение переноса вещества S выглядит следующим образом: первая форма $\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial(SV)}{\partial x}$, вторая форма (тождественная)

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -(V \frac{\partial S}{\partial x} + S \frac{\partial V}{\partial x}) \quad (1)$$

где: ∂ - частная производная, t - время, сек; x - пространственная координата, м; S - некоторая масса материи, кг; V - скорость движения материи, м/сек.

Общеизвестные и широко применяемые в мировой практике конечно-разностные аналоги конвективных частей уравнения (1) могут при некоторых распределениях скоростей могут терять консервативность. Здесь не рассматривается диффузия примеси, которая часто используется для повышения устойчивости в вычислениях [5, 9].

Покажем, что самые простейшие задачи аэрогидродинамики уже в двумерном пространстве почти всегда гарантируют формирование полей скоростей, при которых общезвестные схемы теряют свою консервативность.

Заметим, что уравнение (1) является записью закона сохранения материи в дифференциальной форме. Это означает, что всегда и при любых скоростях перемещения вещества его количество не должно изменяться. Это обязательное свойство называется свойством консервативности [10, 11].

Запишем конечно-разностные аналоги уравнения (1) наиболее часто применяемые на практике и записанные в явной форме. Явными схемами называются схемы, в которых будущее распределение вещества полностью рассчитываются на основании имеющегося распределения вещества и известных скоростей перемещения вещества [12, 13, 14]. Самыми распространенными схемами расчета являются схемы направленных разностей [3, 7, 8, 10].

Повсеместно распространенная конечно-разностная схема направленных разностей носит имя "схема Куранта - Изаксона - Риса" [10]. Эта схема считается и консервативной и транспортной и устойчивой при выполнении условия Куранта-Леви [12, 15, 16, 17, 18]. Транспортными схемами называются схемы, которые при применении обеспечивают имитацию движения числовых значений характеризующих количество вещества в направлении скорости движения [10, 19, 20, 21].

Методика исследования. Математический анализ дифференциальных уравнений и их конечно-разностных аналогов. Тестовые расчеты с привлечением простейших инструментов для вычислений. Сравнение результатов вычислений с аналитическими решениями и общими представлениями о сути законов сохранения при переносе вещества.

Результаты исследований и обсуждение. Для первой формы записи уравнения (1) имеем конечно-разностный аналог (2)

$$S_{t+1,i} = S_{t,i} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,i} * S_{t,i} - V_{t,i-1} * S_{t,i-1}), \text{ если } V_{t,i} > 0 \quad (2)$$

$$S_{t+1,i} = S_{t,i} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,i+1} * S_{t,i+1} - V_{t,i} * S_{t,i}), \text{ если } V_{t,i} < 0$$

Для второй формы записи уравнения (1) имеем конечно-разностный аналог (3)

$$S_{t+1,i} = S_{t,i} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,i} * (S_{t,i} - S_{t,i-1}) + S_{t,i} * (V_{t,i+1} - V_{t,i})) , \text{ если } V_{t,i} > 0 \\ S_{t+1,i} = S_{t,i} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,i} * (S_{t,i+1} - S_{t,i}) + S_{t,i} * (V_{t,i} - V_{t,i-1})) , \text{ если } V_{t,i} < 0 \quad (3)$$

Первая форма записи уравнения переноса вещества (1) используется повсеместно и почти во всех аэрогидродинамических моделях.

Заметим, что вторая форма записи уравнения (1) и ее конечно-разностный аналог (далее к.-р. аналог) почти никогда и нигде не используется в связи с необходимостью большего количества вычислений по сравнению с первой формой записи уравнения переноса вещества при тождественности результатов в случае одинаковых распределений скоростей и при неизменности знака скорости. Но причины этого игнорирования на наш взгляд гораздо серьезней. Однако, именно вторая форма записи уравнения (1) позволила сконструировать новый и абсолютно консервативный к.-р. аналог для решения уравнения (1). Консерватизм конечно-разностных схем-аналогов для уравнений переноса проверяется следующим образом. Выпisyваются расчетные значения вещества в будущий момент времени для последовательности точек расчета, и проверяется их взаимоуничтожение при суммировании. Рассмотрим распределение скоростей по оси X при котором нарушается консервативность конечно-разностных аналогов (2) и (3). Пусть для узлов с порядковым номером меньше 7 скорость движения вещества положительна, а на узлах с порядковым номером 7 и выше скорость движения вещества отрицательна.

Тогда к.-р. аналог (2) для группы узлов в окрестности узла с номером 7 будет выглядеть следующим образом:

$$S_{t+1,4} = S_{t,4} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,4} * S_{t,4} - V_{t,3} * S_{t,3}); \\ S_{t+1,5} = S_{t,5} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,5} * S_{t,5} - V_{t,4} * S_{t,4}); \\ S_{t+1,6} = S_{t,6} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,6} * S_{t,6} - V_{t,5} * S_{t,5}); \\ S_{t+1,7} = S_{t,7} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,8} * S_{t,8} - V_{t,7} * S_{t,7}); \\ S_{t+1,8} = S_{t,8} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,9} * S_{t,9} - V_{t,8} * S_{t,8}); \\ S_{t+1,9} = S_{t,9} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,10} * S_{t,10} - V_{t,9} * S_{t,9}); \quad (4)$$

Оставим без внимания одинокие слагаемые " $V_{t,10} * S_{t,10}$ " и " $V_{t,3} * S_{t,3}$ ". Эти слагаемые должны провзаимодействовать или с граничными условиями или сократиться с слагаемыми появляющимися при вычислении " $S_{t+1,3}$ " и " $S_{t+1,10}$ ". Но заметим что слагаемые " $V_{t,6} * S_{t,6}$ " и " $V_{t,8} * S_{t,8}$ " при заданной смене знака скоростей в точке с индексом 7 не сокращаются. Это означает, что схема признанная как консервативная и применяемая повсеместно при определенных условиях теряет консервативность.

Напишем формулы расчета распределения вещества S при условии, что была использована вторая форма записи уравнения переноса вещества (1):

$$S_{t+1,4} = S_{t,4} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,4} * S_{t,4} - V_{t,3} * S_{t,3} + V_{t,5} * S_{t,4} - V_{t,4} * S_{t,4}); \\ S_{t+1,5} = S_{t,5} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,5} * S_{t,5} - V_{t,4} * S_{t,4} + V_{t,6} * S_{t,5} - V_{t,5} * S_{t,5}); \\ S_{t+1,6} = S_{t,6} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,6} * S_{t,6} - V_{t,5} * S_{t,5} + V_{t,7} * S_{t,6} - V_{t,6} * S_{t,6}); \\ S_{t+1,7} = S_{t,7} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,7} * S_{t,8} - V_{t,7} * S_{t,7} + V_{t,8} * S_{t,7} - V_{t,6} * S_{t,7}); \\ S_{t+1,8} = S_{t,8} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,8} * S_{t,9} - V_{t,8} * S_{t,8} + V_{t,9} * S_{t,8} - V_{t,7} * S_{t,8}); \\ S_{t+1,9} = S_{t,9} - \frac{\Delta t}{\Delta x} * (V_{t,9} * S_{t,10} - V_{t,9} * S_{t,9} + V_{t,10} * S_{t,9} - V_{t,8} * S_{t,9}); \quad (5)$$

Так же как и в случае схемы (4) оставим без внимания слагаемые " $V_{t,4} * S_{t,3}$ " и " $V_{t,9} * S_{t,10}$ ". Эти слагаемые или должны провзаимодействовать с граничными условиями или уничтожаться при вычислении вещества в точках с индексами "3" и "10".

Видно, что слагаемые $V_{t,6} \cdot S_{t,5}$ и $V_{t,6} \cdot S_{t,7}$ не уничтожаются, если скорость переноса вещества меняет знак в точке "7" и как это записано выше.

Даже эта редкая, но иногда применяемая в расчетах схема при определенных условиях теряет также консервативность. Здесь она рассматривается только потому, что именно она позволила создать новую консервативную схему расчета движения примеси, об этом будет сказано далее по тексту.

Рассмотрим следующую тестовую задачу. Одномерный расчетный участок разделен на части таким образом, что имеется 100 расчетных узлов. Пусть расстояние между узлами равно плюс единице. На участке от первого до пятидесяти узла скорость положительна и равна единице. На участке от пятьдесят первого узла до узла с индексом 100 скорость отрицательна и равна минус единице. На узлах с номерами "20", "21", "22" скорость слегка снижается до величины +0,8 и на узлах с номерами "79", "80", "81" скорость слегка повышается до величины -0,8. Некоторое понижение скорости в двух зонах расчетного отрезка сделано для того чтобы увидеть поведение конечно-разностных схем при расчете прохождения вещества через эти зоны.

На рисунке 1 показано распределение скоростей пере-

носа вещества для каждого из 100 расчетных узлов.

Начальное распределение вещества. Для всех 100 точек кроме точек с номером "10" и "91" задано отсутствие вещества в начальный момент времени. В точках с номерами "10" и "91" задано начальное содержание вещества равное "10". Решение должно быть транспортным, консервативным, симметричным и адекватным реальности. Симметричность должна наблюдаться в решении как следствие симметричности в распределении скорости и начального распределения вещества. Физически обоснованным решение будет считаться при отсутствии осцилляций в решении. Дело в том, что иногда консерватизм в количестве вещества может сочетаться с появлением необоснованно высоких значений вещества или даже его отрицательными значениями. Будем использовать шаг по времени равный максимальному предельному значению шага по времени по критерию Куранта-Леви, то есть $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{max}} = 1.0$.

Ясно, что вещество, двигаясь к центру расчетного отрезка от узлов с порядковыми номерами 10 и 91 достигнет центра отрезка чуть позже сорокового интервала времени (меньше в связи с тем, что есть участок, где вещество будет двигаться со скоростью 0,8 вместо скорости 1,0).

Отобразим на рисунке 2 распределение вещества в на-

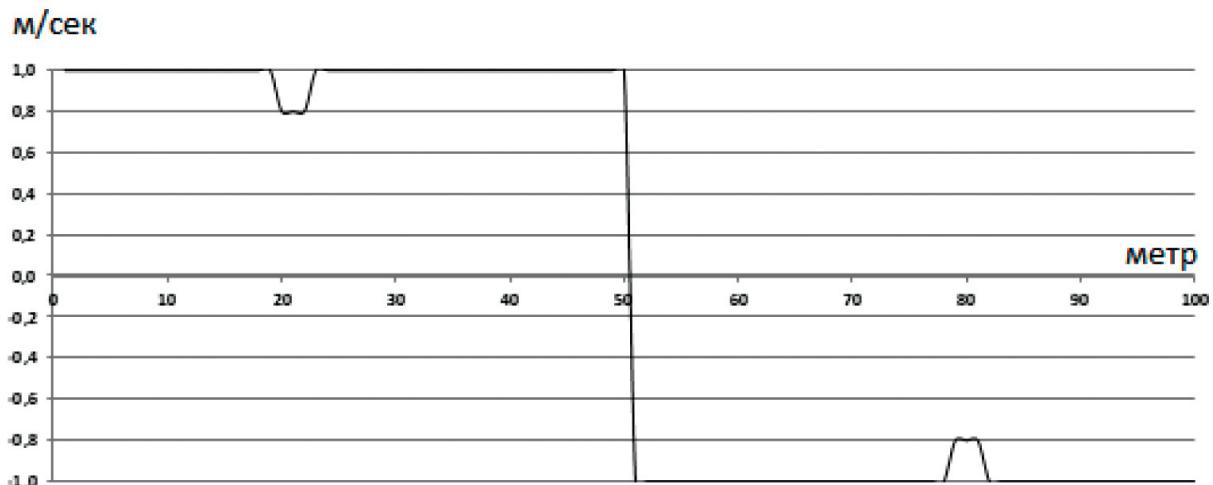


Рис.1. Распределение скоростей переноса вещества для каждого из 100 расчетных узлов

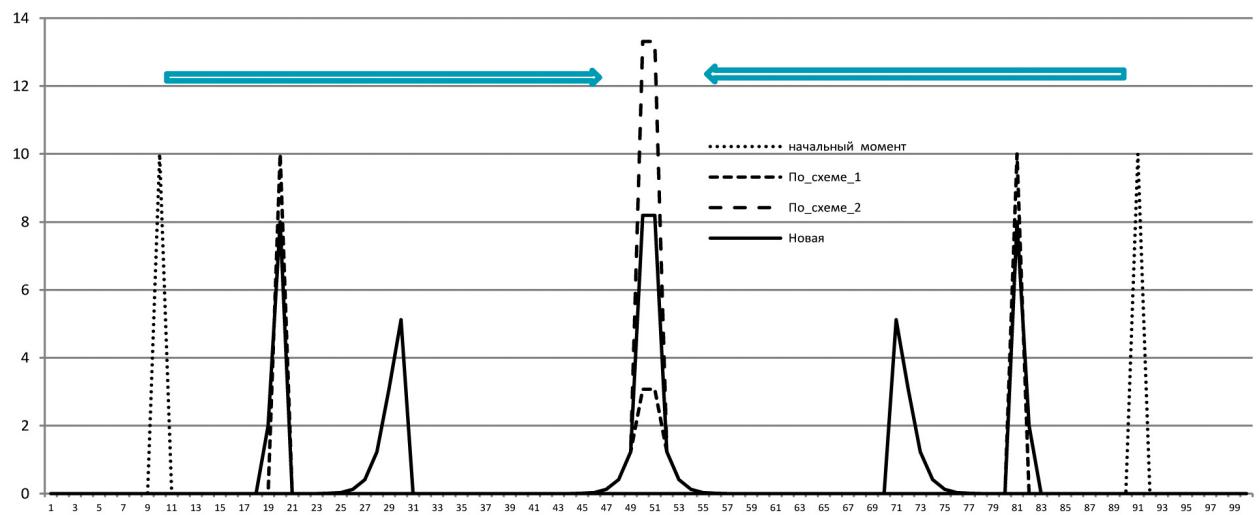


Рис.2. Распределение вещества в начальный момент времени, на 10 отрезок времени (до зон пониженных скоростей), 20 (после зон пониженных скоростей) и 41

чальный момент времени, на 10ый отрезок времени (до зон пониженных скоростей), 20 (после зон пониженных скоростей) и 41. На 41 интервале времени вещества, как и ожидалось, достигает точек с номерами 50 и 51 в которых скорости имеют разный знак и на 41 интервале времени теряется консервативность расчета. Первая форма записи уравнения сохранения массы, записанная в виде конечно-разностного аналога направленных разностей (схема Куранта-Изаксона-Риса) меняет содержание вещества в расчетной зоне с 20 до величины 9.76 (шаг по времени 1, шаг по пространству 1, распределение скоростей дано на рис.1). Вторая форма записи уравнения меняет содержание вещества в расчетной зоне с 20 до величины 30.24, и только новая предлагаемая схема сохраняет консерватизм расчета. При применении новой схемы - вещества было в начальном распределении 20 единиц и осталось таким же даже после переноса вещества к точкам, где скорости меняют знак. Становится также понятным, почему гидродинамики избегают использовать вторую форму записи уравнений сохранения вещества и используют в основном только первую форму записи, исчезновение вещества не может аварийно завершить процесс вычислений. Бесконтрольный же рост количества вещества может вызвать аварийное завершение вычислений. Для первой формы записи даже существует весьма оптимистичное название "дивергентная" форма записи уравнений сохранения [10]. Существует практика перехода от обычных форм записи уравнений к "дивергентной" форме только для обеспечения возможности использования схемы Куранта-Изаксона-Риса [10].

Видно, что новая схема и схема для второй формы записи уравнения сохранения вещества тождественно совпадают на 10 интервале времени, создавая маленький "хвост" пика после прохождения зоны пониженных скоростей. Это и понятно, как будет показано в конце далее, новая схема тождественна схеме второй формы записи уравнения (1) в случае постоянства знака скоростей в соседних расчетных узлах. Однако при дальнейшем расчете (интервал времени 20) "хвост" исчезает и все три исследуемые схемы дают тождественные решения. До 40 интервала времени наблюдается точнейший консерватизм всех трех исследуемых конечно-разностных схем, количество вещества в системе по прежнему равно 20 единицам.

Все становится очень плохо для общеизвестных и широко применяемых на практике конечно разностных схемах (2) и (3) только на 41 интервале времени. И только новая предлагаемая конечно-разностная схема ведет себя консервативно, она транспортная, симметричная, устойчивая и физически адекватная. Запись (6) раскрывает структуру и построение этой схемы.

$$\begin{aligned} U_{t,i} &= V_{t,i} && \text{если } V_{t,i} \geq 0, \\ U_{t,i} &= 0 && \text{если } V_{t,i} > 0, \\ W_{t,i} &= V_{t,i} && \text{если } V_{t,i} \leq 0, \\ W_{t,i} &= 0 && \text{если } V_{t,i} > 0, \\ S_{t+1,i} &= S_{t,i} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[\begin{array}{l} U_{t,i} * (S_{t,i} - S_{t,i-1}) + S_{t,i} * (U_{t,i+1} - U_{t,i}) \\ + \\ W_{t,i} * (S_{t,i+1} - S_{t,i}) + S_{t,i} * (W_{t,i} - W_{t,i-1}) \end{array} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

где: $U_{t,i}, W_{t,i}$ - просто переменные, вычисляемые через значение скорости перемещения вещества в зависимости от знака этой скорости.

Конечно, вычислений в новой схеме в два раза больше, чем в шаблоне (3) для второй формы записи уравнения Сохранения вещества (1). Но это самая маленькая плата, которая сделана для обеспечения консерватизма в расчетах, ведь известно, что потеря консерватизма при решении уравнений сохранения материи может ставить под сомнение правильность любого расчета. Может возникнуть возражение следующего содержания. Невозможно редко встречается ситуация когда в соседних узлах скорости имеют разный знак. Это совершенно неверное возражение. В любой даже двумерной задаче, где имеется расширение или сжатие движущегося потока, перпендикулярные основному движению компоненты скорости будут иметь соседние точки, в которых знак скоростей изменяется на противоположный. Только в трубе постоянного диаметра или русле постоянного поперечного сечения не возникнет ситуаций приводящих к потере консерватизма в расчетах.

Выводы. Ясно что, чем меньше абсолютные значения скоростей меняющих свой знак в соседних точках, тем меньше величина потери консерватизма. Поперечные скорости обычно всегда значительно меньше продольных и основных движений потока вещества. Это обстоятельство обычно маскирует потерю консерватизма. Обнаруженный не консерватизм обычно объясняют ошибками округления цифр при их вычислении на ЭВМ, но это не так, потеря консерватизма концептуально заложена в направленных конечно-разностных аналогах конвективных слагаемых уравнений сохранения вещества. Новая схема (6) свободна от этого недостатка. Результатом применения новой схемы будет возможность использования шагов по времени максимально приближенных к предельному шагу по времени определяемому критерием Куранта-Леви и закономерным результатом применения новой схемы будет повышение эффективности решения аэродинамических задач. Любая из современных двумерных и трехмерных расчетных аэрогидродинамических систем, использующих в вычислениях схему направленных разностей, после самых малых изменений в коде, сможет увеличить и точность, и эффективность расчетов.

№	Литература	References
1	Бакиров К.Б., Дуйшоков К.Д. Численные методы прогноза погоды. Квазигеострофическая баротропная модель атмосферы. Учебное пособие. – Бишкек: Метеорология, 2003. – 39 с.	Bakirov K.B., Duishokov K.D. <i>Chislennyye metody prognoza pogody. Kvazigeostroficheskaya barotropnaya model' atmosfery</i> [Numerical methods of weather forecasting. Quasi-geostrophic barotropic model of the atmosphere]. Bishkek, 2003. 39 p. (in Russian)
2	Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – Москва: МГУ, 2004. – 582 с.	Khromov S.P., Petrosyants M.A. <i>Meteorologiya i klimatologiya</i> [Meteorology and climatology]. Moscow State University. Moscow. 2004. 582 p. (in Russian)
3	Степаненко С.Н. Математическое моделирование мезомасштабных процессов и явлений в атмосфере. – Одесса: Бахва, 2001. – 290 с.	Stepanenko S.N. <i>Matematicheskoye modelirovaniye mezomasshtabnykh protsessov i явления в атмосфере</i> [Mathematical modeling of mesoscale processes and phenomena in the atmosphere]. Odessa, 2001. 290 p. (in Russian)
4	Цыденов Б.О., Старченко А.В. Численное моделирование эффекта термобара в озере Байкал в период весенне-летнего прогревания// Ж.: Математика и механика. – Томск, 2011. – №1(13). – С.120-129.	Tsydenov B.O., Starchenko A.V. <i>Chislennoye modelirovaniye effekta termobara v ozere Baykal v period vesenne-letnego progrevaniya</i> [Numerical modeling of the thermal bar effect in Lake Baikal during the spring-summer warming period]. Mathematics and Mechanics. 2011.No1(13).Pp.120-129.(in Russian)

5	Павлушкин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э.Н. Влияние формы бассейна на формирование циркуляции в Черном море. Морской гидрофизический институт РАН. – Севастополь, 2016. – 15 с.	Pavlushin A.A., Shapiro N.B., Mikhailova E.N. <i>Vliyanie formy basseyna na formirovaniye tsirkulyatsii v Chernom more</i> [Influence of the shape of the basin on the formation of circulation in the Black Sea]. Marine Hydrophysical Institute RAS. Sevastopol. 2016. 15 p. (in Russian)
6	Поморцева А.А., Калинин Н.А. Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов: условия возникновения, методы диагностики и прогноза. //Географический вестник. – Пермь, 2016. – №3, – С. 90-104. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104	Pomortseva A.A., Kalinin N.A. <i>Analiticheskij obzor sovremenennogo sostoyaniya issledovanij shkvalov: usloviya vozniknoveniya, metody diagnoza i prognoza</i> [Analytical review of the current status of studying squalls: formation conditions, methods of diagnosis and prognosis]. Geographical Bulletin. Perm. 2016. No.3. pp. 90-104. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-90-104 .(in Russian)
7	Dymnikov V., Tyrtysnikov E. Lykossov N.V. Zalesny V. Mathematical Modeling of Climate, Dynamics Atmosphere and Ocean: to the 95th Anniversary of G. I. Marchuk and the 40th Anniversary of the INM RAS. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. No56. DOI:10.1134/S0001433820030056	Dymnikov V., Tyrtysnikov E. Lykossov N.V. Zalesny V. <i>Mathematical Modeling of Climate, Dynamics Atmosphere and Ocean: to the 95th Anniversary of G. I. Marchuk and the 40th Anniversary of the INM RAS</i> . Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. No56. DOI:10.1134/S0001433820030056
8	Пененко В.В., Цветова Е.А., Пененко А.В. Методы совместного использования моделей и данных наблюдений в рамках вариационного подхода для прогнозирования погоды и качества состава атмосферы // Ж.: Метеорология и гидрология. – Сибирь, 2015. – №6. – С. 13-24.	Penenko V.V., Tsvetova E.A. <i>Metody sovmestnogo ispol'zovaniya modeley i danniykh nablyudenij v ramkakh variatsionnogo podkhoda dlya prognozirovaniya pogody i kachestva sostava atmosfery</i> [Penenko A.V. Methods for the joint use of models and observational data within the variational approach for forecasting the weather and the quality of the composition of the atmosphere]. Meteorology and hydrology. Siberia. 2015. No.6. Pp. 13-24. (in Russian)
9	Попов И.В., Тимофеева Ю. Е. Построение разностной схемы повышенного порядка аппроксимации для уравнения переноса с использованием аддитивной искусственной вязкости. ИПМ им. М.В. Келдыша. – Москва, 2015. – №39. – 25 с.	Popov I.V., Timofeeva Yu.E. <i>Postroyeniye raznostnoj skhemy povyshennogo poryadka approksimatsii dlya uravneniya perenosa s ispol'zovaniem adaptivnoj ikusstvennoj vyazkosti</i> [Construction of a high-order difference scheme for the transport equation using adaptive artificial viscosity]. Moscow. 2015. No.39. 25 p. (in Russian)
10	Sinaiski E.G. Hydromechanics: Theory and Fundamentals. Germany. 2011. 520 p.	Sinaiski E.G. Hydromechanics: Theory and Fundamentals. Germany. 2011. 520 p.
11	Yuxi Zheng. Systems of Conservation Laws: Two-Dimensional Riemann Problems. Progress in Nonlinear Differential Equations and Their Application .USA. Vol.38. Pp.320-323.	Yuxi Zheng. Systems of Conservation Laws: Two-Dimensional Riemann Problems. Progress in Nonlinear Differential Equations and Their Application .USA. Vol.38. Pp. 320-323.
12	Samarskii A.A. The Theory Of Difference Schemes. Monographs and textbooks in pure and applied mathematics. Moscow. 2001. 240 p.	Samarskii A.A. The Theory Of Difference Schemes. Monographs and textbooks in pure and applied mathematics. Moscow. 2001. 240 p.
13	Моисеев Н. Я., Силантьева И. Ю. Разностные схемы произвольного порядка аппроксимации для решения линейных уравнений переноса с постоянными коэффициентами методом Годунова с антидиффузией // Журнал вычислительной математики и математической физики. – Снежинск, 2008. – №7. том 48. – С. 1282-1293.	Moiseev N. Ya., Silant'eva I. Yu. <i>Raznostnye skhemy proizvol'nogo poryadka approksimatsii dlya resheniya lineynih uravnenij perenosa s postoyannymi koefitsiyentami metodom Godunova s antidifuziej</i> [Difference schemes of an arbitrary order of approximation for solving linear transport equations with constant coefficients by the Godunov method with antidiffusion]. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. Vol. 48. No. 7. 2008. Pp. 1282-1293. (in Russian)
14	Lax P. Wendroff B. Difference Schemes for Hyperbolic Equations with High Order of Accuracy. 2005. Doi:10.1007/0-387-28148-7_19.	Lax P. Wendroff B. Difference Schemes for Hyperbolic Equations with High Order of Accuracy. 2005. Doi:10.1007/0-387-28148-7_19.
15	Luiz C. L. Botelho. Lecture notes in applied differential equations of mathematical physics. Singapore. 2008. 340 p.	Luiz C. L. Botelho. Lecture notes in applied differential equations of mathematical physics. Singapore. 2008. 340 p.
16	Боговский М.Е. Уравнения математической физики. – Москва, 2019. 106 с.	Bogovsky M.E. <i>Uravneniya matematicheskoy fiziki</i> [Equations of mathematical physics]. Moscow. 2019. 106 p. (in Russian)
17	Lax P. Richtmyer R. Survey of the Stability of Linear Finite Difference Equations. Communications on Pure and Applied Mathematics. 2006. DOI: 9. 267-293. 10.1007/0-387-28148-7_11.	Lax P. Richtmyer R. Survey of the Stability of Linear Finite Difference Equations. Communications on Pure and Applied Mathematics. 2006. DOI:9. 267-293. 10.1007/0-387-28148-7_11.
18	Самарский А.А. Конструктивная теория устойчивости разностных схем. – Москва, 2022. – 616 с.	Samarskij A.A. <i>Konstruktivnaya teoriya ustoychivosti raznostnykh skhem</i> [The constructive theory of stability of difference schemes]. Moscow. 2022. 616 p. (in Russian)
19	Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. – Томск, 2016. – 42 с.	Krainov A.Yu., Moiseeva K.M. <i>Chislennyye metody resheniya krayevykh zadach dlya obyknovennykh differentsiyal'nykh uravnenij</i> [Numerical methods for solving boundary value problems for ordinary differential equations]. Tomsk. 2016. 42 p. (in Russian)
20	Зенков А.В. Численные методы. – Екатеринбург, 2016. – 128 с.	Zenkov A.V. <i>Chislennyye metody</i> [Numerical methods]. Yekaterinburg. 2016. 128 p. (in Russian)
21	Попов И.В., В., Фрязинов И. В. Метод аддитивной искусственной вязкости численного решения уравнений газовой динамики. – Москва: Красанд, 2015. – 275 с.	Popov I.V., V., Fryazinov I.V. <i>Metod adaptivnoj ikusstvennoj vyazkosti chislennogo resheniya uravnenij gazovoy dinamiki</i> [Method of adaptive artificial viscosity for numerical solution of equations of gas dynamics]. Moscow: Krasand. 2015. 275 p. (in Russian)