

Куповых Геннадий Владимирович – Южный федеральный университет; email: kupovykh@sfedu.ru, г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371636; кафедра высшей математики, зав. кафедрой; д.ф.-м.н.; профессор.

Клово Александр Георгиевич – email: agklovo@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Тимошенко Дмитрий Владимирович – email: dmitrytim@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Кудринская Татьяна Владимировна – email: tvkudrinskaya@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра Высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Белюсова Ольга Васильевна – email: obelousova@sfedu.ru; тел.: +78634371705; кафедра высшей математики; ассистент.

Kupovykh Gennady Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: kupovykh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371636; the department of higher mathematics; head of department; dr. of phys. and math. sc.; professor.

Klovo Alexander Georgievich – e-mail: agklovo@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Timoshenko Dmitry Vladimirovich – e-mail: dmitrytim@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kudrinskaya Tatiana Vladimirovna – e-mail: tvkudrinskaya@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Belousova Olga Vasilievna – e-mail: obelousova@sfedu.ru; phone: +78634371705; the department of higher mathematics; assistant.

УДК 519.68

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-181-189

В.В. Семенистый, И.Э. Гамоллина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ЯВНЫМ И НЕЯВНЫМ РАЗНОСТНЫМ СХЕМАМ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Задачи вычислительной аэродинамики являются одной из основных областей применения параллельных вычислений. В работе рассматривается параллельное моделирование квазиодномерной системы уравнений газовой динамики, описывающей течение газа по каналу переменного сечения по неявной и явной разностным схемам. Целью данной работы является исследование эффективности способов организации параллельных вычислений по неявным и явным разностным схемам решения внутренних задач аэродинамики. В статье проводится сравнительный анализ предложенных параллельных моделей для системы квазиодномерных уравнений газовой динамики, описывающих течения в канале переменного сечения, для численного решения которой используются различные параллельные алгоритмы. При построении параллельного алгоритма для неявной разностной схемы применяется метод расщепления по физическим процессам. Вычисления проводятся по схеме типа предиктор-корректор с введением сглаживающего оператора на этапе коррекции для подавления осцилляций решения. На дробных шагах схемы для решения трехдиагональных систем применяется алгоритм параллельной скалярной прогонки с выбором параметрических неизвестных. Для сравнения строится параллельный алгоритм для явной схемы Маккормака, широко применяемой в задачах вычислительной аэродинамики. Параллельные вычисления проводятся на вычислительных структурах с распределенной памятью и линейной коммутационной зависимостью между вычислительными устройствами рабочего поля. В работе приведены временные оценки для каждого этапа параллельного вычисления, как

по неявной, так и по явной разностным схемам, на основе которых вычисляется эффективность разработанных параллельных алгоритмов. Оценки показывают, что коэффициент ускорения для явной схемы линейно зависит от числа вычислительных устройств.

Система уравнений газовой динамики; схема предиктор-корректор; организация параллельных вычислений; временные оценки параллельных алгоритмов.

V.V. Semenisty, I.E. Gamolina

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PARALLEL COMPUTING EFFICIENCY FOR EXPLICIT AND IMPLICIT DIFFERENCE SCHEMES FOR COMPUTATIONAL AERODYNAMICS PROBLEMS

One of the main areas of parallel computing application is solving of computational aerodynamics problems. The paper considers parallel modeling of gas dynamics with quasi-one-dimensional system of equations. The system describes the gas flow through a channel with variable cross section using implicit and explicit difference schemes. The purpose of this work is to study the methods efficiency for organizing parallel computations with implicit and explicit difference schemes for solving internal aerodynamics problems. The article presents a comparative analysis of the proposed parallel models for quasi-one-dimensional equations system of gas dynamics. The system describes flows in a channel of variable cross section. Various parallel algorithms are used to solve systems of such type numerically. The method of splitting by physical processes is used for an implicit difference scheme. To suppress the solution oscillations a smoothing operator at the correction stage is introduced in calculations according to the scheme of the predictor-corrector type. In scheme fractional steps the parallel scalar sweep algorithm is used to solve tridiagonal systems with the parametric unknown choice. Besides to compare scheme mentioned above a parallel algorithm is constructed for McCormack's explicit scheme. Such algorithm is widely used in computational aerodynamics. Parallel computations are held by computing structures with distributed memory and by another one – with linear switching dependence between computing devices of the working field. The paper presents time estimations for each computing stage (both by implicit and explicit difference schemes). It helped to calculate the developed parallel algorithms efficiency. It is concluded that the acceleration factor in explicit scheme depends linearly on the computing devices number.

Keywords: System of gas dynamics equations; predictor – corrector method; parallel computing organization; estimation of parallel algorithm time.

Введение. С ростом производительности современной вычислительной техники, основанной на многопроцессорности (многопоточности), возрастает роль организации параллельных вычислений. В настоящее время разработано много базовых параллельных алгоритмов [3, 4, 17] для различных вычислительно сложных задач. Задачи вычислительной аэродинамики являются одной из основных областей применения параллельных вычислений [7, 11, 12]. В работе рассматривается параллельное моделирование квазиодномерной системы уравнений газовой динамики [1, 5, 2] описывающей течение газа по каналу переменного сечения по неявной и явной разностным схемам.

Построение параллельной модели неявного решения течения газа основывается на применении алгоритма параллельной скалярной прогонки [8, 10, 14] для решения трехдиагональных матриц, получающихся на дробных шагах схемы. На этапе коррекции восстанавливается консервативность схемы и происходит подавление осцилляций в решении [18–20].

Параллельные вычисления по явной схеме строятся на использовании геометрического параллелизма для схемы Маккормака [13, 15, 16]. Внутренний параллелизм заложенный в задачи позволяет получить линейное ускорение от числа работающих вычислительных устройств [9, 6].

Основная часть. Проведем сравнительный анализ параллельных разностных моделей для решения системы квазиодномерных уравнений газовой динамики, описывающих течения в канале переменного сечения [1, 5], полученных путем осреднения параметров потока в поперечном направлении. Здесь $A(x)$ – площадь поперечного сечения канала.

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(A\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(A\rho u) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(A\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}[A(\rho u^2 + p)] = p \frac{dA}{dx} \\ \frac{\partial}{\partial t}(AE) + \frac{\partial}{\partial x}[Au(E + p)] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Система записывается в векторном дивергентном виде уравнением

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}W = F \quad (2)$$

или в недивергентном виде – уравнением

$$\frac{\partial f}{\partial t} + Bf = 0, \quad f = (\rho, u, p)^T.$$

Для численного решения системы уравнений могут использоваться разностные схемы приближенной факторизации и схемы типа предиктор-корректор с различной формой расщепления и различным порядком аппроксимации расщепленных разностных операторов, векторов потоков и вектора правой части.

1. Параллельные вычисления по неявным разностным схемам. Исследования. При вычислении решения искомой системы уравнений на высокопроизводительной вычислительной структуре с линейной коммутационной зависимостью по схеме предиктор-корректор с введением сглаживающего оператора на этапе коррекции ([18],[20]):

$$\begin{cases} \frac{f^{n+\frac{1}{4}} - f^n}{\tau\alpha} + B_{1h}^1 f^{n+\frac{1}{4}} = 0 \\ \frac{f^{n+\frac{1}{2}} - f^{n+\frac{1}{4}}}{\tau\alpha} + B_{2h}^1 f^{n+\frac{1}{2}} = 0 \\ \frac{U^{n+1} - U^n}{\tau} + \Lambda^2 W^{n+\frac{1}{2}} = F^{n+\frac{1}{2}} \end{cases}$$

получаем следующие временные оценки (для одной итерации):

На первом дробном шаге этапа предиктора при вычислении компонент плотности и скорости (давление переносится с предыдущего временного слоя) будет затрачено (здесь $m = [N/p]$):

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = (40m - 50)t_a + 8t_0$$

время на выполнение последовательного расчета:

$$T_{noc} = (16p - 14)t_a + 6(p - 2)t_0$$

время на вычисление коммутационных обменов:

$$T_0 = 10(p - 2)t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = (16N + 2)t_a$$

Здесь параметры t_a и t_0 – среднее время выполнения одной арифметической операции и время выполнения операции обмена одним словом (соответственно) между соседними вычислительными устройствами. Параметры t_a и t_0 зависят от топологии сети коммутационной системы вычислительной структуры.

На втором дробном шаге этапа предиктора вычисляется давление и пересчитывается значение скорости (плотность переносится с первого дробного шага).

На этом этапе имеем:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = (30m - 25)t_a + 4t_0$$

время на выполнение последовательного расчета:

$$T_{noc} = (8p - 7)t_a + 3(p - 2)t_0$$

время на вычисление коммутационных обменов:

$$T_0 = (5p - 9)t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = (13N + 1)t_a$$

На этапе коррекции восстанавливается консервативность схемы, но из-за симметричной аппроксимации первых производных вектора потока и правой части в решении появляются осцилляции. Для их подавления в разностную схему вводится следующий сглаживающий оператор второго порядка малости ([2]):

$$\Delta W_j = \frac{W_{j+1} - W_{j-1}}{2h} - \frac{h}{2} \text{sign}(u) \varepsilon \frac{W_{j+1} - 2W_j + W_{j-1}}{h^2},$$

$$\varepsilon = \frac{|W_{j+1} - 2W_j + W_{j-1}|}{|W_{j+1} - W_j| + |W_j - W_{j-1}|} \quad \text{и} \quad \varepsilon = 0, \text{ если } |W_{j+1} - W_j| + |W_j - W_{j-1}| = 0.$$

С учетом преобразования разностной схемы время работы высокопроизводительной системы на этом этапе вычислений:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 62mt_a + 8t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 62Nt_a$$

Полное время параллельной работы на всех этапах численного алгоритма расчета течения газа по неявной разностной схеме составит ([10]):

$$T_{nop} \approx (132m + 24p - 96)t_a + 24pt_0 - 27t_0$$

временных тактов.

Для однопроцессорной вычислительной системы оно составляет

$$T \approx (91N + 3)t_a \text{ временных тактов.}$$

Коэффициент ускорения решения аэродинамической задачи на вычислительной структуре выбранной архитектуры приближенно равен

$$\bar{K}_y \approx \frac{91N}{132m + 24(1 + \alpha)p}.$$

Здесь за $\alpha = \frac{t_0}{t_a}$ обозначается величина, характеризующая быстродействие канала связи.

Замечание. Оценки приведены для одного временного шага. Для получения стационарного решения методом установления необходимо провести сотни итераций.

2. Параллельные вычисления по явным разностным схемам. Для численного решения воспользуемся явной разностной схемой Маккормака [13], которая представляет схему типа предиктор-корректор, и может быть записана для системы (2), например, в следующей операторной форме:

$$\begin{cases} U_j^{n+1/2} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (W_j^n - W_{j-1}^n) + \Delta t F_j^n \\ U_j^{n+1} = \frac{1}{2} (U_j^n + U_j^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (W_{j+1}^{n+1/2} - W_j^{n+1/2}) + \frac{\Delta t}{2} F_j^{n+\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь вектор решения $U = \begin{pmatrix} A\rho \\ A\rho u \\ A\rho E \end{pmatrix}$, вектор потока $W = \begin{pmatrix} A\rho u \\ A\rho u^2 + p \\ A u(E + p) \end{pmatrix}$ и вектор

правой части $F = \begin{pmatrix} 0 \\ p \frac{dA}{dx} \\ 0 \end{pmatrix}$.

Благодаря использованию сопряженных разностных операторов на шагах предикции и коррекции достигается второй порядок аппроксимации по пространству, но так как схема явная то для получения устойчивого решения должно быть выполнено условие куранта.

Проведем временной анализ параллельного решения системы (1) или (2) по явной схеме Маккормака на вычислительной системе с линейной топологией связи. Как и в случае неявной разностной схемы для получения временных оценок вычисления разобьем на промежуточные этапы.

Этап вычисления значений координат вектора потока для предиктора схемы. Используя уравнения состояния совершенного газа для вычисления значений внутренней энергии единицы массы газа и массовой плотности полной энергии, а также для пересчета координат вектора потока, получаем следующие временные оценки (для начальной итерации):

временем выполнения параллельного расчета:

$$T_{np} = 20mt_a + t_0$$

и временем работы однопроцессорной системы:

$$T = 20Nt_a$$

На остальных итерациях временные оценки совпадают с аналогичным этапом для корректора схемы.

Этап реализации предиктора. Для нахождения вектора решения на промежуточном временном слое (первое уравнения системы (3)) вычислительное устройство затратит:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 11mt_a + 5t_0$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 11Nt_a$$

Этап вычисления значений координат вектора потока для корректора схемы. Для проведения расчетов на этапе коррекции разностного решения надо пересчитать компоненты векторов потоков и правой части для промежуточного временного слоя. Значение давления считается отдельно, так как оно не входит в решение системы. С учетом этого

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 17mt_a$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 17Nt_a$$

Этап реализации корректора. На последнем этапе численного алгоритма вычисляются значения вектора решения на новом временном слое. Расчет ведется для второго разностного уравнения системы (3). В вычислениях используются значения параметров двух временных слоев, поэтому время решения больше чем на этапе предиктора и равно:

время на выполнение параллельного расчета:

$$T_{np} = 17mt_a + 3t_o$$

и время работы однопроцессорной системы:

$$T = 17Nt_a$$

Время параллельной работы вычислительной системы на этапах численного алгоритма расчета течения газа по явной разностной схеме составит $T_{nop} \approx 65mt_a + 9t_o$ временных тактов.

Для однопроцессорной вычислительной системы оно составляет $T \approx 65Nt_a$ временных тактов.

Заключение. Проведено исследование эффективности способов организации параллельных вычислений по неявным и явным разностным схемам решения внутренних задач аэродинамики со сравнительным анализом предложенных параллельных моделей. Приведенные оценки для времени вычислений на каждом этапе показывают, что коэффициент ускорения для явной схемы линейно зависит от числа вычислительных устройств. Следует отметить, что в расчетах не учитывались временные затраты, связанные с обращением к памяти системы.

При организации вычислений предпочтительнее использовать явные параллельные разностные модели (хотя они и обладают меньшим запасом устойчивости) так их эффективность растет линейно с ростом вычислительных элементов системы, в то время как неявные параллельные схемы имеют предел масштабируемости и с ростом вычислительных устройств эффективность алгоритма уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковеня В.М. Алгоритмы расщепления при решении многомерных задач аэрогидродинамики. – Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2014. – 280 с.
2. Kovenya V.M. Splitting method in the problems of CFD// Computational Fluid Dynamics Journal. –1999. – Vol. 8, No. 2. – P. 186-194.
3. Voevodin V.V. Mathematical foundations of parallel computing // Series in computer science. – World Scientific Publishing Co, 1992. – Vol. 33. – 343 p.
4. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. 2nd ed. revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – P. 651-701.
5. Борисов А.В., Ковеня В.М., Яненко Н.Н. Об одной консервативной разностной схеме для решения стационарных уравнений газовой динамики // Математические модели течений жидкости: Тр. 6-го Всесоюзного семинара по численным методам механики вязкой жидкости, Кунгура осень 1976. – Новосибирск.-ИТиПМ, 1978. – Т. 10, №6. – С. 15-22.
6. Гамолina И.Э., Семенистый В.В. Параллельная организация вычислений при расчете задач аэрогидродинамики прямыми методами. Международное Научное Сотрудничество, Образование и Культура. – Ростов-на-Дону: Изд-во Summa-Rerum, 2014. – № 3(4). – С. 23-28.
7. Nour-Omid B., Raefsky A., Lyzenga G. Solving finite element equations on concurrent computers / A.K. Noor, ed. American Soc. Mech. – 1986. – P. 291-307.

8. Яненко Н.Н., Коновалов А.Н., Бугров А.Н., Шустов Г.В. Об организации параллельных вычислений и распараллеливание прогонки // Численные методы механики сплошных сред. – 1978. – № 7. – С. 136-139.
9. Семенистый В.В., Гамolina И.Э., Дурагина В.В. Конструирование эффективных параллельных алгоритмов для решения полной двумерной системы уравнений Навье–Стокса по явной схеме Мак-Кормака // Сб. материалов II международной научно-практической конференции «Исследования и разработки в перспективных научных областях». – Новосибирск, 2017. – С. 88-95.
10. Семенистый И.И., Гамolina И.Э., Дурагина В.В. Моделирование сверхзвукового течения по каналу переменного сечения с использованием среды ANSYS. ("КомТех"). – Таганрог. – 2019. – С.138-145.
11. Семенистый В.В., Гамolina И.Э. Исследование способов организации параллельного решения внешних задач аэродинамики на основе схем расщепления // Известия ЮФУ, Технические науки. – 2020. – №5. – С. 60-67.
12. Семенистый В.В., Гамolina И.Э. Организация структур данных при параллельных вычислениях задач аэродинамики // Матер. 4-той Международной научной конференции, Майкоп. – 2021. – С.262-265.
13. MacCormack R.W. The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // J. Spacecraft and Rockets. – 2003. – Vol. 40, No. 5. – P. 757-763.
14. Теренков В.И., Арсений В.Ф., Евсеев Е.Г., Луцкий Я.А., Семенистый В.В. О корректности и устойчивости алгоритма распараллеливания прогонки // Тр. инт-та прикл. математ. им. И.Н. Векуа Тбилис. ун-та, Тбилиси. – 1985. – С. 298-307.
15. Caughey Hafez. Contributions of Robert Mac-Cormack to Computational Fluid Dynamics // Frontiers of Computational Fluid Dynamics. – 2002. – P. 1-26.
16. Bram V. Upwind and High-Resolution Methods for Compressible Flow: From Donor Cell to Residual-Distribution Schemes // Communications in computational physics. – 2006. – Vol. 1, No. 2. – P. 192-206.
17. Баркалов К.А. Методы параллельных вычислений. Тбилисского ун-та. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – 124 с.
18. Ковеня В.М., Слюняев А.Ю. Модификация алгоритмов расщепления для задач газовой динамики и Навье–Стокса // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – С.71-86.
19. Kovenya V.M., Eremin A.A. Predictor-Corrector Difference Scheme for Numerical Solution of the Euler and Navier–Stokes Equations // Journal of Mathematical Sciences. – 2016. – Vol. 215, No. 4. – P. 484-498.
20. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. Second edition revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – P. 651-701.

REFERENCES

1. Kovenya V.M. Algoritmy rasshchepleniya pri reshenii mnogomernykh zadach aerogidrodinamiki [Splitting algorithms for solving multidimensional problems of aerohydrodynamics]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2014, 280 p.
2. Kovenya V.M. Splitting method in the problems of CFD, *Computational Fluid Dynamics Journal*, 1999, Vol. 8, No. 2, pp.186-194.
3. Voevodin V.V. Mathematical foundations of parallel computing, *Series in computer science*. World Scientific Publishing Co, 1992, Vol. 33, 343 p.
4. Hoffman J.D. Numerical methods for engineers and scientists. 2nd ed. revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc. 2001, pp. 651-701.
5. Borisov A.V., Kovenya V.M., Yanenko N.N. Ob odnoy konservativnoy raznostnoy skheme dlya resheniya statsionarnykh uravneniy gazovoy dinamiki [On one conservative difference scheme for solving stationary equations of gas dynamics], *Matematicheskiye modeli techeniy zhidkosti. Tr.6-go Vsesoyuznogo seminar po chislennym metodam mekhaniki vyazkoy zhidkosti* [Mathematical Models of Fluid Flows: Proceedings of the 6th All-Union Seminar on Numerical Methods of Viscous Fluid Mechanics, Kungura autumn 1976]. Novosibirsk: ITiPM, 1978, Vol. 10, No 6, pp. 15-22.

6. *Gamolina I.E., Semenisty V.V.* Parallelnaya organizatsiya vychisleniy pri raschete zadach aerogidrodinamiki pryamymi metodami. Mezhdunarodnoe nauchnoe sotrudnichestvo, obrazovanie i kul'tura [Parallel organization of calculations in the calculation of problems of aerohydrodynamics by direct methods. International scientific cooperation, education and culture]. Rostov-on-Don: Summa-Rerum. 2014, No. 3 (4), pp. 23-28.
7. *Nour-Omid B., Raefsky A., Lyzenga G.* Solving finite element equations on concurrent computers. A.K. Noor, ed.. American Soc. Mech. 1986, pp. 291-307.
8. *Yanenko N.N., Konovalov A.N., Bugrov A.N., Shustov G.V.* Ob organizatsii parallel'nykh vychisleniy i rasparallelivanie progonki [On the organization of parallel calculations and parallelization of the run], *Chislennyye metody mekhaniki sploshnykh sred* [Numerical methods of continuum mechanics], 1978, No. 7, pp. 136-139.
9. *Semenisty V.V., Gamolina I.E., Duryagina V.V.* Konstruirovaniye effektivnykh parallel'nykh algoritmov dlya resheniya polnoy dvumernoy sistemy uravneniy Nav'e-Stoksa po yavnoy skheme Mak-Kormaka [Designing effective parallel algorithms for solving a complete twodimensional system of Navier-Stokes equations according to the explicit McCormack scheme], *Sb. materialov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Issledovaniya i razrabotki v perspektivnykh nauchnykh oblastiakh»* [Collection of materials of the II International Scientific and Practical Conference "Research and Development in promising scientific fields"]. Novosibirsk. 2017, pp. 88-95.
10. *Semenisty I.I., Gamolina I.E., Duryagina V.V.* Modelirovaniye sverkhzvokovogo techeniya po kanalu peremennogo secheniya s ispolzovaniyem sredey ANSYS. [Supersonic flow simulation through a channel with variable cross section using software ansys "KomTekh"]. Taganrog. 2019, pp. 138-145.
11. *Semenisty V.V., Gamolina I.E.* Issledovaniye sposobov organizatsii parallelnogo resheniya vneshnikh zadach aerodinamiki na osnove skhem rasshchepleniya [Study of parallel solution organization for external aerodynamics problems based on splitting schemes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskkiye nauki.* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 5, pp. 60-67.
12. *Semenisty V.V., Gamolina I.E.* Organizatsiya struktur dannykh pri parallel'nykh vychisleniyakh zadach aerodinamiki [Data structure organization using parallel calculations for problems of aerohydrodynamics], *Mater. 4-toy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proceedings of the 4th International Scientific Conference, Maykop], 2021, pp. 262-265.
13. *MacCormack R.W.* The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, *J. Spacecraft and Rockets*, 2003, Vol. 40, No. 5, pp. 757-763.
14. *Terentov V.I., Arsenii V.F., Evseev E.G., Lutskiy Ya.A., Semenisty V.V.* O korrektnosti i ustoychivosti algoritma rasparallelivaniya progonki [On the correctness and stability of the parallelization algorithm of the run], *Tr. int-ta prikl. matemat. im. I.N. Vekua Tbilis. un-ta* [Proceedings of the I.N. Vekua Institute of Applied Mathematics]. Tbilisi, 1985, pp. 298-307.
15. *Caughey Hafez.* Contributions of Robert Mac-Cormack to Computational Fluid Dynamics, *Frontiers of Computational Fluid Dynamics*, 2002, pp. 1-26.
16. *Bram V.* Upwind and High-Resolution Methods for Compressible Flow: From Donor Cell to Residual-Distribution Schemes, *Communications in computational physics*, 2006, Vol. 1, No. 2, pp. 192-206.
17. *Barkalov K.A.* Metody parallel'nykh vychisleniy. [Parallel Computing Methods]. N. Novgorod: Izd-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2011, 124 p.
18. *Kovenya V.M., Slyunyayev A.Yu.* Modifikatsiya algoritmov rasshchepleniya dlya zadach gazovoy dinamiki i Navye-Stoksa [Modification of splitting algorithms for gas dynamics and Navier-Stokes problems], *Vychislitelnyye tekhnologii* [Computational technologies], 2007, Vol. 12, No. 3, pp. 71-86.
19. *Kovenya, V.M., Eremin A.A.* Predictor-Corrector Difference Scheme for Numerical Solution of the Euler and Navier-Stokes Equations, *Journal of Mathematical Sciences*, 2016, Vol. 215, No. 4, pp. 484-498.
20. *Hoffman J.D.* Numerical methods for engineers and scientists. Second edition revised and expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc.. 2001, pp. 651-701.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.Ю. Медведев.

Семенистый Владимир Васильевич – Южный федеральный университет; e-mail: vlad60sem@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282135206; кафедра высшей математики; к.ф.-м.н.; доцент.

Гамолина Ирина Эдуардовна – e-mail: iegamolina@sfnu.ru; тел.: 89185190837; кафедра высшей математики; к.т.н.; доцент.

Semenisty Vladimir Vasil'evich – Southern Federal University; e-mail: vlad60sem@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282135206; the department of higher mathematics; cand. of phys.-math. sc.; associate professor.

Gamolina Irina Eduardovna – e-mail: iegamolina@sfnu.ru; phone: +79185190837; the department of higher mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.4(519.766)

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-189-201

О.И. Атакищев, В.Г. Грибулин, В.Е. Ананьев, Е.А. Титенко

РЕКОНФИГУРАЦИОННЫЕ МЕТАГРАММАТИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЭТАПНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ АТАК

Цель исследования определяется существенным расширением классов угроз современным автоматизированным системам, динамичным развитием тактик и техник атак на их информационные ресурсы. Имеющиеся методы и аппаратно-программные средства эффективно противостоят одноэтапным атакам, имеющим фиксированную схему деструктивного воздействия и ограниченную во времени активность. Современные типы деструктивных воздействий понимаются как многоэтапные комплексные атаки, для которых актуально создание адекватного и эффективного аппарата описания, моделирования и отражения новых типов атак. Методы исследования основаны на развитии структурно-алгебраического подхода, в первую очередь – аппарата формальных грамматик и метаграмматик. Установлено, что известные формальные модели для описания и моделирования многоэтапных комплексных атак получаются громоздкими, затруднена их модификация. Большинство дескрипторов атак не оснащены представительным набором методов структурного и алгебраического анализа подобных сложно структурированных объектов. Для описания, моделирования и отражения таких атак разработан класс реконфигурационных метаграмматик. Эти метаграмматики содержат набор обычных и реконфигурационных правил согласования между элементами грамматик в составе грамматики. Данные правила позволяют выбирать в зависимости от достигнутых состояний синтаксического анализа конкретные ветви графа поиска. Это свойство существенно сокращает пространство перебора и повышает тем самым удельную эффективность поиска. Разработанный аппарат реконфигурационных метаграмматик создает необходимый теоретический базис для их эффективного использования при моделировании и отражении существующих и перспективных МКА, имеющих структурно-лингвистическое описание. Полученная в результате квалитметрическая пятимерная диаграмма, построенная на набору практически значимых показателей (однородность, связность, компактность, адаптивность, направленность) показала преимущество реконфигурационных метаграмматик перед метаграмматиками общего вида. Методы синтаксического анализа в реконфигурационных метаграмматиках отличаются структурными правилами реконфигурации (структурной адаптации) и критериями выбора при их адаптации. Эти процедурные особенности позволяют расширить возможности моделирования атак и повысить эффективность процедур отражения многоэтапных комплексных атак.

Моделирование; иерархический грамматический разбор; структурная адаптация; реконфигурационное правило согласования.