УДК 519.85:004.42
DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-50-64

Технология построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах

О. Ю. Лукашов [1], **Д. А. Костромин** [2]

[1] *ООО «ШатхЭксперт-Системы»
Кемерово, Россия*

[2] *Томский государственный университет
Томск, Россия*

Аннотация

Описывается технология дискретизации расчетной области для решения нестационарных газодинамических задач в сфере промышленной безопасности угольных шахт. Важнейшей из них является расчет параметров воздушных ударных волн и зон поражения при взрывах метана в горных выработках. Технология позволяет автоматизировать построение разностной сетки для пространственной сети горных выработок с учетом особенностей топологии шахт и моделируемых процессов. При этом сетка может состоять из ячеек различной размерности – одномерных, двумерных и трехмерных. К ячейкам рекурсивно могут применяться операции субдискретизации до заданного уровня глубины и объединения ячеек ранее субдискретизированных областей. Целью работы является создание основ для развития научных исследований газодинамических процессов при взрывах газа в горных выработках за счет учета новых факторов – средств взрывозащиты, участия угольной пыли и др. В задачи работы входят: разработка системы адресации для идентификации и быстрого доступа к произвольным ячейкам разностной сетки; построение однозначных пространственных связей между соответствующими гранями ячеек при их разбиении и объединении; тестирование технологии на сети горных выработок реальной шахты. Новым подходом в работе является возможность автоматизации разбиения расчетной области с одновременным использованием ячеек всех трех размерностей. Статья содержит детали реализации технологии, показаны результаты разбиения сети горных выработок реальной угольный шахты, результаты расчетов с применением полученной сетки, сходимость результатов к некоему решению при уменьшении шага в результате субдискретизации расчетной области с разной глубиной разбиения.

Ключевые слова

угольная шахта, разностная сетка, моделирование, воздушные ударные волны, дискретизация

Для цитирования

Лукашов О. Ю., *Костромин Д. А.* Технология построения локально детализированных разностных сеток для расчета зон поражения при взрывах газа и пыли в угольных шахтах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 1. С. 50–64. DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-50-64

Technology of Building Locally Detailed Differential Grids for the Calculation of Affected Areas at Gas and Dust Explosions in Coal Mines

O. Yu. Lukashov, **D. A. Kostromin**

[1] *LLC ShatkhExpert-Systems*
Kemerovo, *Russian Federation*

[2] *Tomsk State University*
Tomsk, *Russian Federation*

Abstract

The article describes the technology of discretization of the computational domain for solving unsteady gas-dynamic problems in the field of industrial safety of coal mines. The most important of this problem is the calculation of the parameters of air shock waves and the affected areas during methane explosions in mine workings. The technology allows you to automate the construction of a differential grid for a spatial network of mine workings, taking into account the features of the mines topology and simulated processes. At the same time, the grid can consist of cells of various dimensions – one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional. The aim of the work is to create the basics for the development of scientific research of gas-dynamic processes in gas explosions in mining workings by taking into account new factors – means of explosion protection, the participation of coal dust, etc. The tasks of the work include: developing an addressing system for identification and quick access to arbitrary cells of the difference grid; the construction of unambiguous spatial relationships between the corresponding faces of the cells during their splitting and combining; testing of the technology on the mine network of a real mine. A new approach in the work is the possibility of automating the partition of the computational domain with the simultaneous use of cells of all three dimensions. The article contains details of the implementation of technology. The article shows the results of splitting the network of mine workings in a real coal mine, the results of calculations using the obtained grid and the convergence of the results to a solution when reducing the step as a result of subsampling the computational domain with different depth of splitting.

Keywords

coal mine, differential grid, modeling, air shock waves, discretization

For citation

Lukashov O. Yu., Kostromin D. A. Technology of Building Locally Detailed Differential Grids for the Calculation of Affected Areas at Gas and Dust Explosions in Coal Mines. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2020, vol. 18, no. 1, p. 50–64. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2020-18-1-50-64

Введение

В настоящее время для расчета распространения ударных волн при взрывах метана в угольных шахтах применяется отраслевая методика газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн (ВУВ) при взрывах газа и пыли в шахтах (далее – Методика) [1]. В ее основе лежат уравнения газовой динамики в нестационарной постановке [1], что значительно выделяет ее на фоне аналогичных методик [2; 3], используемых ранее. Классический подход позволяет развивать методику за счет учета новых факторов, например взрывного горения угольной пыли [4; 5], решать задачи взрыволокализации в горных выработках [6; 7], а также комбинировать модель, используемую в методике, с нестационарными газодинамическими моделями проветривания шахты [8; 9] и решать комплексную задачу математического моделирования развития [10].

Численное решение уравнений, составляющих основу указанной Методики, подразумевает пространственную дискретизацию расчетной области – одномерное разбиение прямолинейных участков горных выработок (ветвей) и по одной трехмерной ячейке в сопряжениях и точках изменения геометрии выработок [11; 12], (рис. 1). Оптимальный шаг по пространству, определенный в ходе многочисленных экспериментов, составляет 4 м.

[1] Методика газодинамического расчета параметров воздушных ударных волн при взрывах газа и пыли. Утверждена Госгортехнадзором России 02.04.2003.

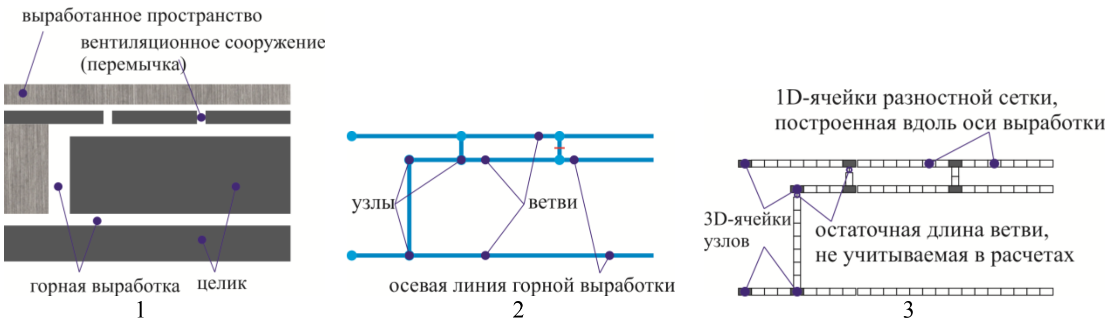


Рис. 1. Существующий принцип построения разностной сетки:
1 – схема добычного участка угольной шахты; *2* – соответствующие осевые линии;
3 – разностная сетка, построенная по осевым линиям

Fig. 1. The existing principle of building a differential grid:
1 – coal mine mining scheme; *2* – respective axis lines; *3* – differential grid which was constructed by the axial lines

Актуальность

Описанная выше схема разбиения проста, обеспечивает высокую скорость и необходимую точность расчетов определения границ опасных зон при взрывах газа в шахте. Но ее обратной стороной является отсутствие детализированной картины происходящих физических процессов в целом ряде характерных мест. Таковыми являются сопряжения, повороты, места изменения геометрии горных выработок, сбойки, ближайшие окрестности перемычек и заслонов (водяных или сланцевых). При экспертизе аварий в шахте изучение процессов, происходящих вблизи перечисленных мест и объектов, часто требуется более детальная картина протекания газодинамических процессов, нежели обеспечивается текущей реализацией Методики.

С другой стороны, простое уменьшение шага по пространству приведет к пропорциональному снижению скорости расчета, в то время как реализация Методики не является научным приложением в полном смысле и должна обеспечивать приемлемое время расчетов на персональных компьютерах.

Такие противоположные друг другу требования делают актуальным разработку и применение в Методике адаптивных сеток. Это позволит динамически менять шаг по пространству, сгущая или укрупняя сетку в характерных местах по мере изменения интенсивности газодинамических процессов (рис. 2). Кроме того, учитывая особенности топологии сетей горных выработок угольных шахт, представляется оправданным и возможным динамическое изменение размерностей ячеек, преимущественно в сторону их снижения, в целях радикального ускорения расчетов.

Постановка задачи

Требуется разработать технологию разбиения ячеек базовой разностной сетки, построенной для пространственной сети горных выработок угольной шахты, до заданного уровня детализации, обеспечив при этом информацию о связях между ячейками и условия для дальнейшей передачи данных в модуль расчета параметров ВУВ. В целях сохранения уже существующей математической модели детализированная сетка должна быть ортогональной.

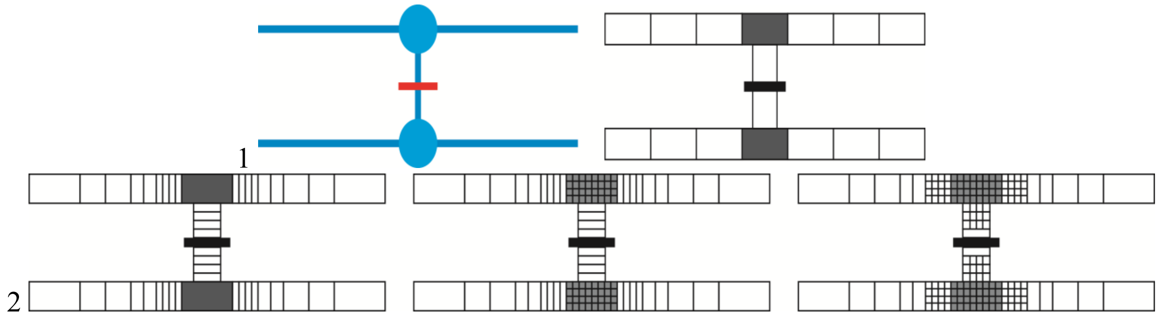


Рис. 2. Варианты построения разностных сеток:
1 – участок горных выработок вблизи сбойки с вентиляционной перемычкой – осевые линии и существующий вариант построения разностных сеток; *2* – возможные варианты детализации разностной сетки вблизи характерных объектов

Fig. 2. Variants of construction of difference grids:
1 – section of mine workings near the bridge with a ventilation jumper; *2* – possible options for detailing the difference grid near characteristic objects

Разбиение должно быть возможным:

- в ручном режиме, за счет явного указания оператора, выполняющего расчеты, отдельных ячеек, подлежащих разбиению;
- в полуавтоматическом режиме, за счет указания лишь характерных точек, с дальнейшим автоматическим разбиением некоторой локальной зоны вокруг них. При этом выбор алгоритма, размерности и детализации разностной сетки могут осуществляться автоматически;
- в полностью автоматическом режиме, когда и выделение характерных объектов, и процесс разбиения выполняются без участия человека.

Ручной режим полностью управляется оператором без применения специальных алгоритмов. Полуавтоматический режим разбиения подразумевает применение некоторой методики, которая позволяла бы определять размеры локально детализируемых зон, глубину их детализации, размерности ячеек, критерии и закономерности разбиения. В качестве критериев могут выступать:

- особенности структуры шахтной сети, например углы поворотов или взаимное расположение горных выработок;
- степень относительного изменения геометрических параметров – величины поперечного сечения выработок, формы крепи и т. д.;
- вид объекта, вокруг которого определяется буферная зона – сопряжение, вентиляционные сооружения, водяной или сланцевый заслон, а также протяженность выработки, в которой они установлены.

Полностью автоматический режим может учитывать дополнительные условия, в частности:

- учитывать расстояние до эпицентра взрыва в целях предварительной оценки интенсивности ожидаемых процессов (например, распространения ВУВ через сопряжение). В данном случае могут быть произведены грубые оценки без учета волновых эффектов на основе экспериментальных данных;
- выполнять динамическую оценку параметров распространения ВУВ на каждом временном слое для адаптивного перестроения разностных сеток.

Особенности топологии сети горных выработок

Для каждого вида точки и объекта (сопряжение, перемычка, …) могут использоваться и учитываться разные методики и факторы, а также специфические условия, характерные для угольных шахт. Поэтому была проведена систематизация фактов и учтены особенности предметной области при построении разностной сетки:

- разностная сетка для расчета распространения ВУВ строится на основе пространственной сети горных выработок;
- сетка является структурированной с фиксированным шагом h по пространству;
- вдоль ветвей (прямолинейных участков горных выработок) используется одномерное разбиение. Продольный размер (длина) ячейки равен h, поперечный размер соответствует сечению горной выработки;
- в узлах (сопряжениях, на поворотах и в точках изменения геометрии горных выработок) используется по одной трехмерной ячейке. Размеры по трем ортогональным направлениям также равны $h \times h \times h$;
- особенности геологии и проходки горных выработок угольных шахт, для которых и применяется Методика, таковы, что практически отсутствуют гладкие повороты и значительные перепады сечений горных выработок. В сопряжениях выработки примыкают друг к другу, как правило, под значительными углами;
- для правильного расчета распределения энергии и массы воздуха при его движении через сопряжение необходимо знать углы отклонения осевых линий прилегающих выработок к соответствующим граням пространственной расчетной ячейки, моделирующей это сопряжение [1] (рис. 3).

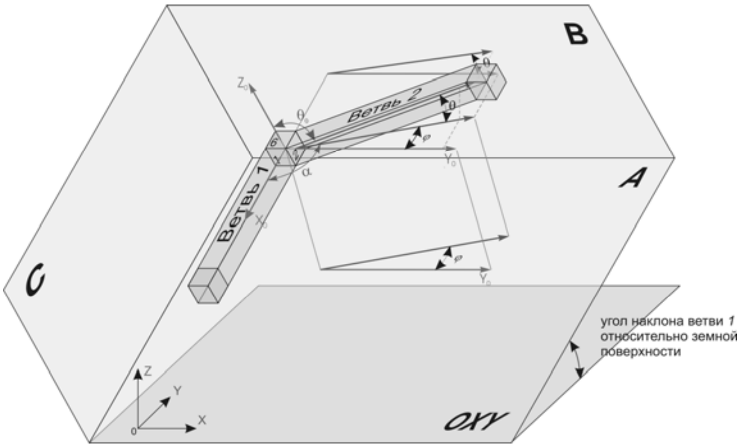


Рис. 3. Схема расчета углов

Fig. 3. Angles calculation scheme

Перечисленные выше особенности шахтных сетей позволяют использовать кубы и прямоугольные параллелепипеды не только в качестве базовых расчетных объемов, но и при любом уровне их дискретизации. Это исключает усложнение математической модели для расчета параметров ВУВ в этих областях.

Реализация технологии

Для реализации поставленной задачи выбран подход, основанный на локальной адаптации декартовых сеток (ЛАД) [13]. Такие сетки позволяют описать геометрию сложных областей; максимально точно передать движущиеся поверхности разрывов, ударных волн, фазовых переходов и другие области больших градиентов функций. Задача построения ЛАД сеток на сегодняшний день является чрезвычайно актуальной и востребованной, о чем свидетельствует большое количество публикаций [14–18]. Основное отличие от известных реализаций заключается в возможности устанавливать связи между смежными ячейками разной размерности и произвольными уровнями дискретизации.

На момент написания статьи адаптация изначально структурированной декартовой сетки, где разбиение производится по какому-то заранее выбранному закону, выполняется в ручном режиме с помощью использования следующих древовидных структур [19]: двоичные, квадро- и октодеревья. В таких структурах при разбиении исходная (родительская) ячейка сохраняется, являясь своеобразным контейнером для более мелких (дочерних) ячеек, лежащих внутри исходной. При этом бинарные деревья используются для одномерного разбиения ячеек, квадродеревья – для двумерного, а октодеревья – для трехмерного (рис. 4). Значимым преимуществом использования древовидных структур является сохранение кратности при дроблении ячеек, что, как будет показано далее, существенно помогает в нахождении соответствий и установлении связей между смежными ячейками. Пример субдетализации расчетной ячейки на основе квадродерева для третьего уровня детализации представлен на рис. 5.

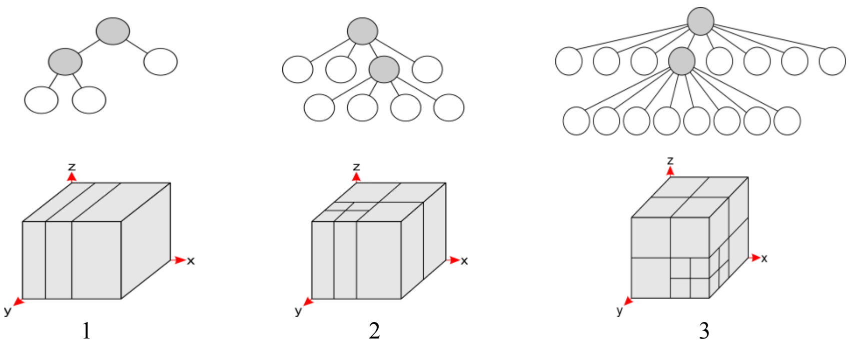


Рис. 4. Структуры данных: *1* – двоичное дерево; *2* – квадродерево; *3* – октодерево
Fig. 4. Data structures: *1* – binary tree; *2* – quadtree; *3* – octotree

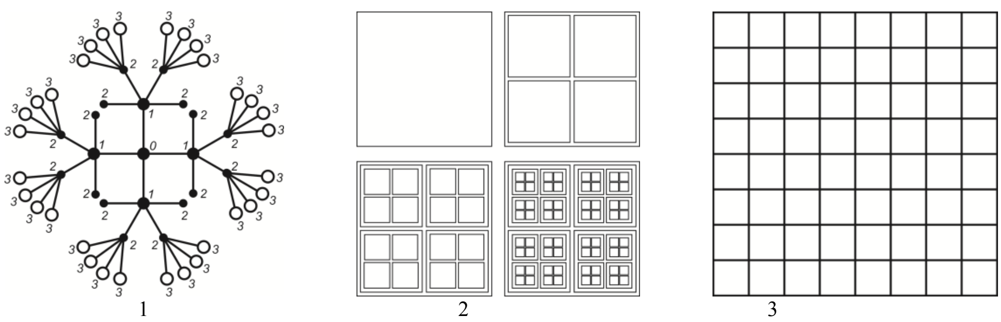


Рис. 5. Схема детализации разностной сетки на основе квадродерева при двумерном разбиении расчетной ячейки: *1* – квадродерево третьего уровня детализации; *2* – схема вложенности расчетных ячеек, соответствующая квадродереву; *3* – итоговая разностная сетка, участвующая в расчете
Fig. 5. Difference grid detailing scheme based on a quadtree with a two-dimensional partition of the computational cell: *1* – quadtree with third level of detail; *2* – nesting scheme of computational cells, corresponding quadtree; *3* – resulting difference grid that involved in the calculation

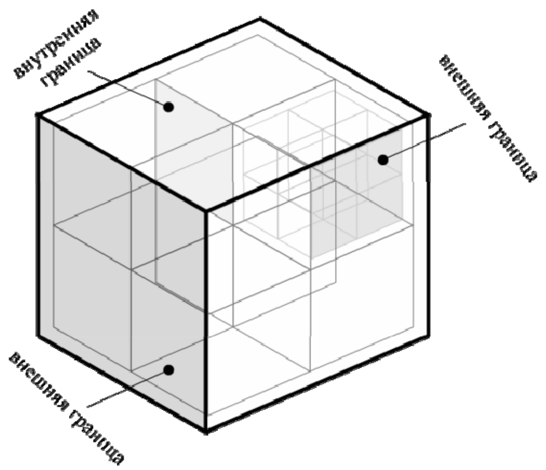


Рис. 6. Элементы технологии
Fig. 6. Elements of technology

Для детализации локальных зон были определены следующие элементы (рис. 6).

Ячейка – элементарный объем пространства, для которого в процессе решения с использованием конечно-объемного метода определяются физические параметры среды. Если ячейка была подвергнута субдетализации, то она содержит список дочерних ячеек, которых в зависимости от размерности может быть две, четыре или восемь. Все дочерние ячейки имеют ссылку на своего «родителя». Размерности дочерних ячеек изначально совпадают с родительской, но в последствии могут быть изменены на более высокие. Так, например, «дочки» двумерной ячейки могут быть также двумерными или трехмерными, но не могут быть одномерными. При этом размерности дочерних ячеек внутри одной родительской могут различаться. Любая дочерняя ячейка может быть впоследствии рекурсивно субдетализирована по тем же правилам, что и родительская. После субдетализации размерность родительской ячейки меняться не может.

Локальная область – это часть расчетной области, которую можно выделить в качестве наиболее крупной логической единицы пространства. Она объединяет в общем случае группу ячеек, которые могут быть разных размерностей. Для Методики в локальные области выделяются узлы и ветви. Каждая локальная область имеет шесть границ, называемых внешними.

Граница – хранит связи, соединяющие две смежные ячейки. Граница называется *внутренней*, если она соединяет две ячейки одного уровня детализации, и *внешней*, если она является границей локальной области. Граница также хранит углы сопряжения смежных ячеек и имеет собственный тип, определяющий граничные условия при решении газодинамической задачи (рис. 7):

- открытая граница – выход из шахты на земную поверхность;
- глухая граница – сплошная поверхность: тупик, грудь подготовительного забоя, борт, почва и кровля горной выработки;
- нормальная – связывает две смежные ячейки.

Создание границ при дискретизации расчетной области происходит следующим образом. При инициализации данных границы локальной области назначаются соответствующим внешним граням ячеек нулевого уровня детализации. При дальнейшем разбиении ячеек выполняется аналогичная операция – каждая родительская ячейка «отдает» свои границы внешней оболочке дочерних ячеек. Таким образом все ячейки всех уровней разбиения имеют одну и ту же внешнюю границу.

Связь определяет контактную границу двух смежных ячеек, через которую происходит движение рассчитываемой физической среды (в нашем частном случае – газа). Связи создаются в процессе субдетализации ячеек и хранятся в границах. Для однозначной идентификации контактной границы (т. е. граней, через которые осуществляется связка ячеек) была разработана следующая система индексации.

Каждая грань ячейки (контактная граница) имеет адрес, включающий:

- *собственный индекс*, состоящий из:
  - *размерности* ячейки;
  - *кода положения* данной ячейки на грани родительской ячейки;
- *индексов* всех родительских ячеек.

Размерность ячейки может принимать значения 1, 2 или 3.

Код положения является комбинацией четырех битов с возможными значениями 0 или 1, объединенных через логическое *ИЛИ*. Значение, равное 1, указывает, что грань дочерней ячейки занимает определенную часть соответствующей границы родительской ячейки по правилу: 0-й бит – верхнюю, 1-й бит – нижнюю, 2-й бит – левую, 3-й бит – правую часть. При этом понятия «лево», «право» применяются для направления вдоль оси X; «низ», «верх» – для направления вдоль оси Z, а ось Y в этом случае является нормалью к данной грани.

Для образования адреса размерность и код положения объединяются в одно трехзначное число. На рис. 8 показаны примеры индексов и полного адреса. Индекс 115 означает, что данная дочерняя ячейка является одномерной (на это указывает первая единица) и занимает всю площадь родительской грани (комбинация бит: 1111 означает, что дочерняя грань занимает все четыре четверти родительской, покрывая ее целиком; в десятичном выражении эта комбинация равна 15). Этот случай на рисунке отражает одномерное разбиение родительской ячейки вдоль оси Z (образовано две одномерных ячейки, одну из которых на рисунке не видно). Если продолжить такое одномерное разбиение, то получится еще одна ячейка второго уровня разбиения, имеющая адрес на данной грани *115.115*. Если преобразовать эту дочернюю одномерную ячейку в трехмерную и разбить ее, получится множество дочерних со следующими индексами: *115.309*, *115.305*, *115.306*, *115.310.*

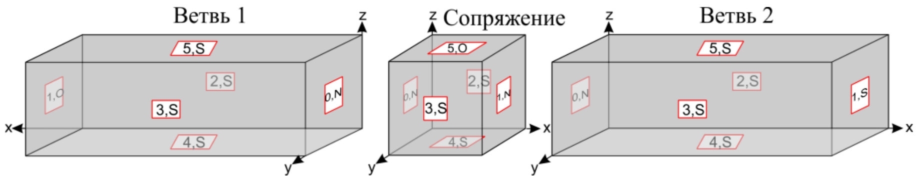


Рис. 7. Правила определения и нумерации границ
(числа – номера границ; O – открытая, S – глухая, N – нормальная границы)
Fig. 7. Rules for defining and numbering borders
(numbers are numbers of borders; O – open, S – solid, N – normal)

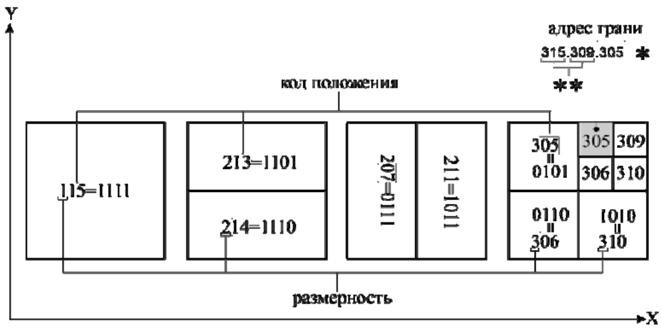


Рис. 8. Схема адресации ячеек
(* – собственный индекс, ** – родительский индекс, длина адрес грани равна трем,
что соответствует двум последовательным разбиениям)
Fig. 8. Cell addressing scheme
* – own index, ** – parent index, the length of the address is three,
which corresponds to two successive divisions)

На рис. 9 дан пример последовательного разбиения двух ячеек (слева – на трехмерную, справа – на двумерную) и показан результат установления связей между соответствующими гранями.

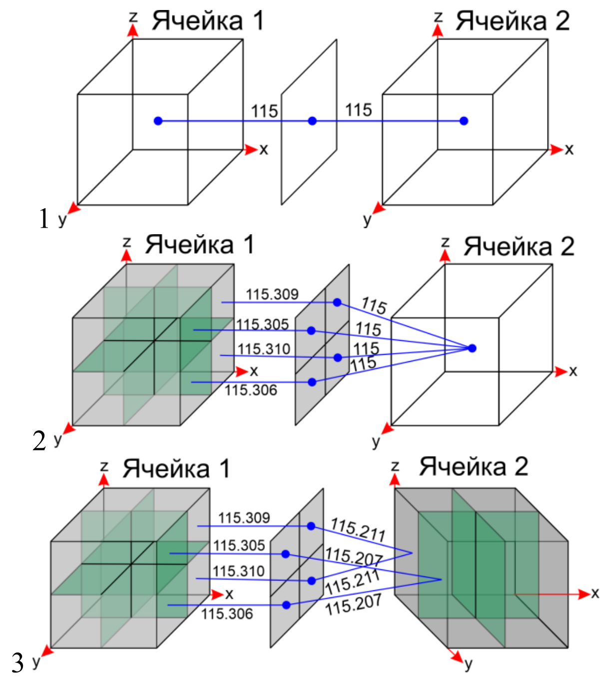


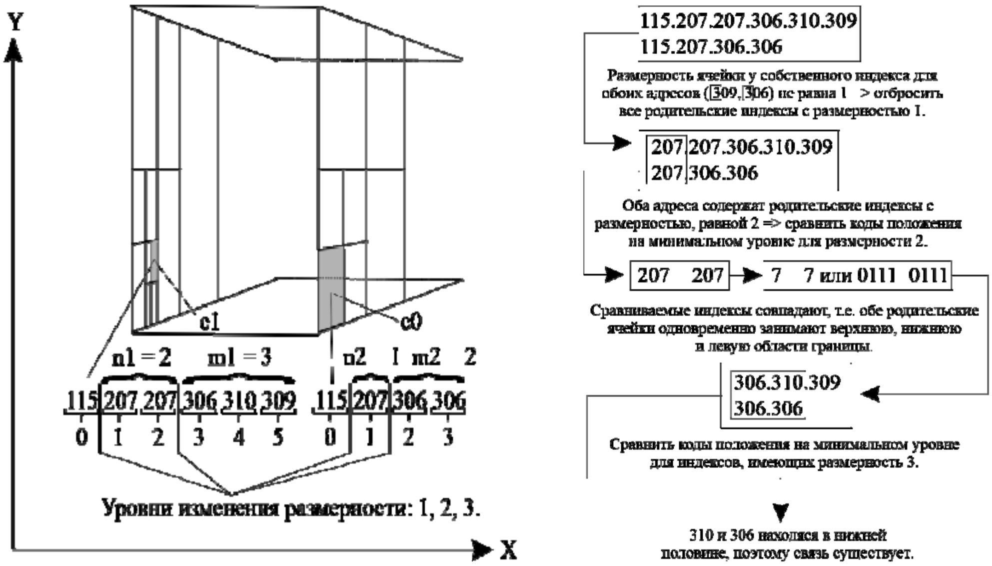
Рис. 9. Пример формирования адресов при разбиении:
1 – до разбиения; *2* – после разбиения ячейки 1 на трехмерные ячейки;
3 – после разбиения ячейки 2 на двухмерные ячейки
Fig. 9. An example of the formation of addresses in the process of splitting:
1 – before splitting; 2 – after splitting cell 1 into three-dimensional cells;
3 – after splitting cell 2 into two-dimensional cells

На рис. 10 представлены детали проверки существования связи между смежными гранями. Проверка заключается в специальном алгоритме сравнения кодов положения ячеек на определенных уровнях детализации.

Практическая реализация

Описанная технология реализована в виде приложения, разработанного в среде Visual Studio. Приложение позволяет в ручном режиме выполнять детализацию разностной сетки произвольной заданной области, в том числе с возможностью указания произвольной глубины разбиения (уровня детализации) ячеек. Примеры детализации разностных сеток в сопряжениях горных выработок показаны на (рис. 11, 12).

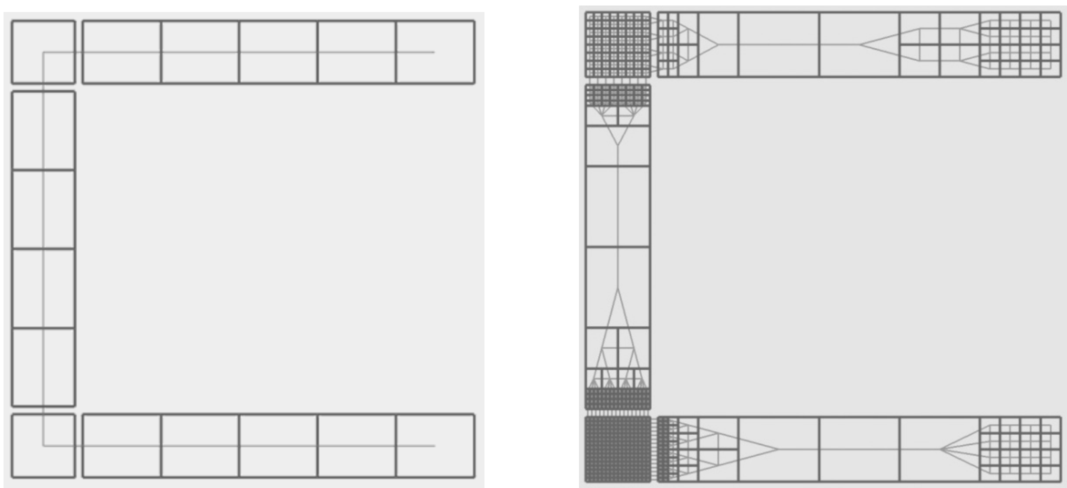
Проверка корректной работы алгоритма проводилась на простой модели, состоящей из двух смежных прямолинейных участков длиной по 200 м каждый (рис. 13). Один край зоны является тупиком, имитируя подготовительный забой в шахте, на расстоянии 90 м от него находится зона взрыва протяженностью 20 м. Давление в зоне составляет 0,6 МПа. Второй край модели имеет открытую границу. Эксперимент заключался в выполнении ряда численных расчетов одного и того же случая с последовательным кратным уменьшением шага по пространству и проверкой давления в контрольной точке, расположенной в 240 м от глухой границы. Зона взрыва расположена таким образом, чтобы исключить влияние фронта ВУВ, отраженной от тупиковой границы, на давление в контрольной точке. Первый расчет проводился с шагом по пространству 4 м, затем шаг последовательно уменьшался в два раза. При проверке отслеживалось значение максимального давления во фронте ударной волны в контрольной точке при различных h (рис. 14).



1 2

Рис. 10. Проверка существования связи: *1* – пример нахождения индексов изменения размерности в ячейках; *c0* – ячейка, полученная после дробления; *c1* – ячейка, составляющая связь с родительской ячейкой *c0* до дробления; *n1*, *n2* – количество двумерных разбиений; *m1*, *m2* – количество трехмерных разбиений; *2* – пример пошаговой проверки существования связи для данных адресов

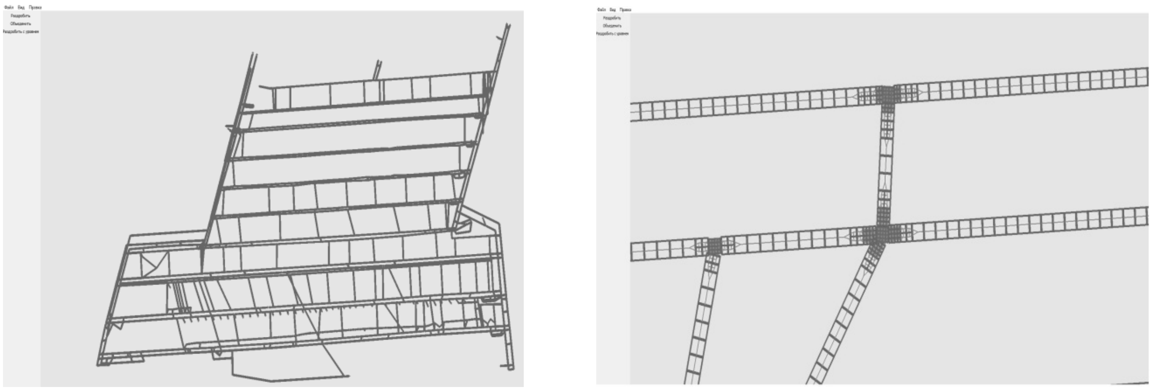
Fig. 10. Link existence check: *1* – an example of finding dimension change indices in cells; *c0* is the cell obtained after crushing; *c1* is the cell making up the connection with the parent cell *c0* before crushing; *n1*, *n2* – the number of two-dimensional fragmentations; *m1*, *m2* – the number of three-dimensional fragmentations; *2* – an example of a step-by-step verification of the existence of communication at given addresses



1 2

Рис. 11. Пример локальной детализации модели очистного участка угольной шахты:
1 – общий вид; *2* – после детализации

Fig. 11. An example of local detailing model for the coal mine cleanup section:
1 – general view; *2* – after detailing



1 2

Рис. 12. Внешний вид приложения с загруженной сетью горных выработок шахты «Котинская» АО «СУЭК-Кузбасс»: *1* – общий вид; *2* – участок шахты с детализированной разностной сеткой
Fig. 12. The view of an application with a loaded network of mine workings for the Kotinsky mine: *1* – general view; *2* – mine section with a detailed differential grid

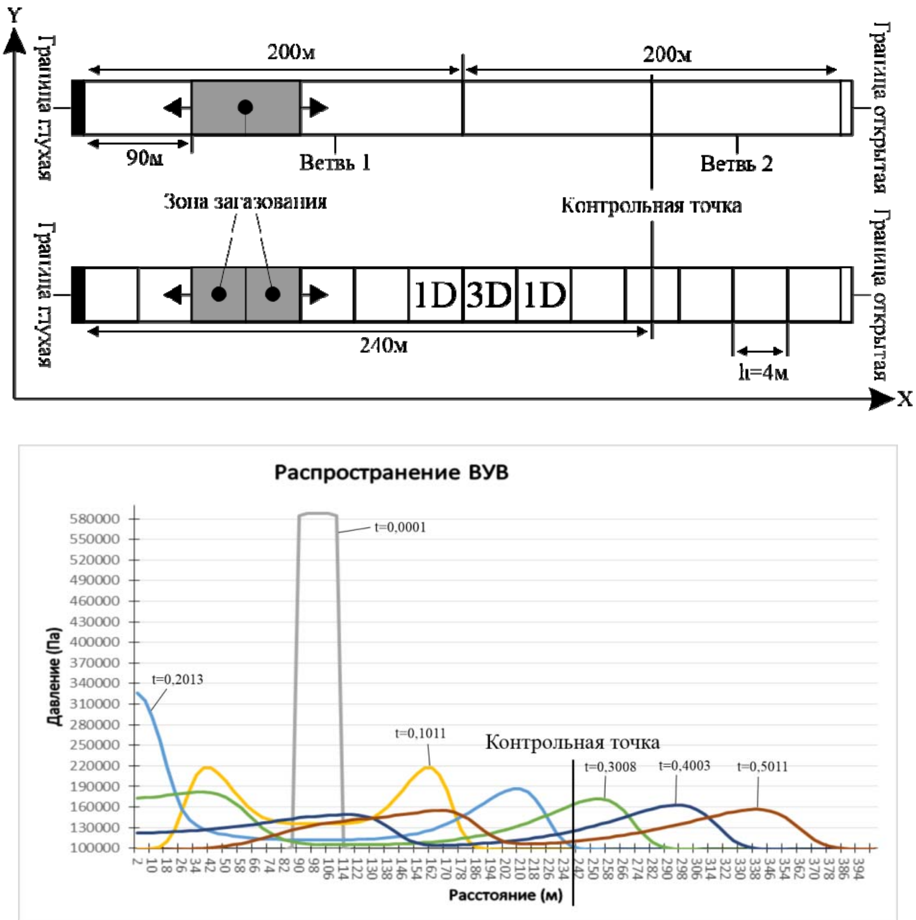


Рис. 13. Эксперимент: вверху – модель для проведения численного эксперимента; внизу – график распространения ВУВ по модели в различные моменты времени при h = 4 м
Fig. 13. Experiment: upper picture – a model for conducting a numerical experiment; lower picture – a graph of the propagation of the air shock wave at various points in time with h = 4 m

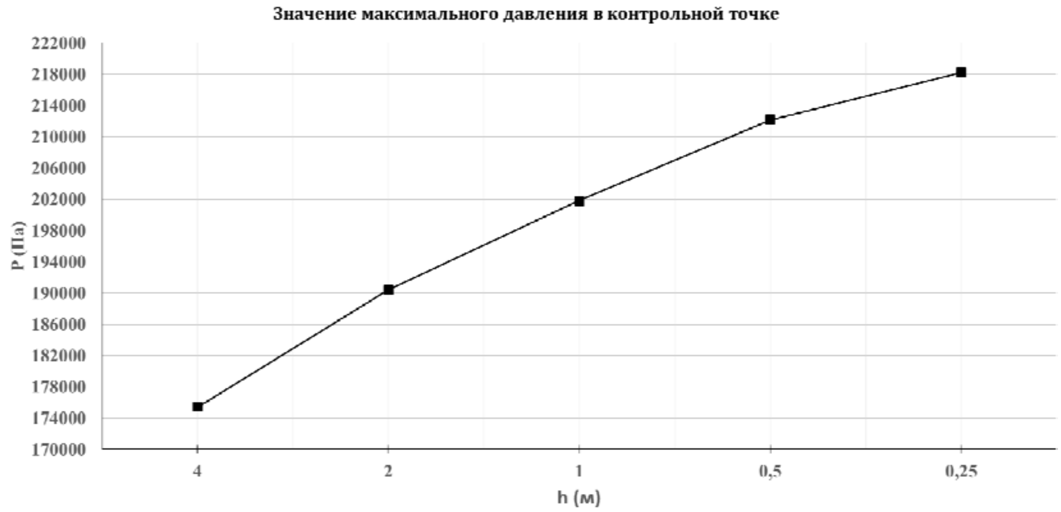


Рис. 14. Зависимость значения максимального давления ВУВ от размера шага по пространству в контрольной точке: горизонтальная ось (*h*) – шаг по пространству, вертикальная ось (*P*) – давление в контрольной точке
Fig. 14. The dependence of the maximum pressure of an air shock wave on the step size in space at the control point: the horizontal axis (*h*) is the step in space, the vertical axis (*P*) is the pressure at the control point

Видно, что с уменьшением *h* давление стремится к некоторому предельному значению – точному решению, что объясняется снижением аппроксимационной вязкости и, как следствие, к более выраженному профилю фронта ВУВ. Этим же подтверждается сеточная сходимость используемого в Методике разностного метода и корректность созданной технологии дискретизации расчетной области.

Заключение

В результате выполненных исследований разработана технология локальной детализации разностных сеток, основанная на использовании двоичных, квадро- и октодеревьев, и эффективного способа адресации ячеек. Адресация позволяет отказаться от использования методов вычислительной геометрии для связывания смежных ячеек при дроблении расчетной сетки. Важной особенностью технологии является возможность связывать ячейки разной размерности с произвольными уровнями дискретизации. Результаты исследований планируется использовать при исследовании газодинамических процессов при расчетах распространения ВУВ в горных выработках угольных шахт. Технология реализована в виде компьютерной программы на языке программирования C++.

Список литературы

1. **Лукашов О. Ю.** Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвленной сети горных выработок: Дис. … канд. физ.-мат. наук. Томск, 2003. 141 с.
2. Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ. М.: Недра. 1986. 254 с.
3. Устав военизированной горноспасательной части (ВГСЧ) по организации и ведению горноспасательных работ на предприятиях угольной и сланцевой промышленности. М., 1997. 201 с.

4. **Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Костеренко В. Н.** Моделирование распространения ударных волн от взрыва и горения газопылевой смеси в угольных шахтах // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 371–377.
5. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем / Под ред. И. М. Васенина. Томск, 2006. 322 с.
6. **Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Костеренко В. Н.** Гашение энергии ударной волны водяным заслоном при взрыве слоевого скопления метана // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 385–389.
7. **Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Костеренко В. Н.** Взаимодействие ударной волны взрывов метана с облаком порошкового ингибитора // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 377–381.
8. **Палеев Д. Ю., Аксенов В. В., Лукашов О. Ю., Васенин И. М., Крайнов А. Ю., Шрагер Э. Р.** Моделирование аэродинамических процессов в вентиляционных сетях современных горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S7. С. 224–230.
9. **Васенин И. М., Костеренко В. Н., Крайнов А. Ю., Лукашов О. Ю., Палеев Д. Ю., Шрагер Э. Р.** Газодинамический метод расчета нестационарных нормальных и аварийных режимов проветривания шахты // Пожарная безопасность. 2018. № 1. С. 32–41.
10. **Лукашов О. Ю.** О комплексном подходе к моделированию аварийной ситуации при взрыве газа в угольной шахте // Вестник Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2014. № 6 (32). С. 86–93.
11. **Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю.** Распространение поражающих факторов взрыва в сети горных выработок // Вопросы безопасности труда на горных предприятиях: Сб. науч. тр. Кемерово: КузГТУ, 2003.
12. **Палеев Д. Ю.** Ударные волны при взрывах в угольных шахтах // Промышленная безопасность. М.: Горное дело; ООО «Киммерийский центр», 2011. 312 с. (Библиотека горного инженера. Т. 6, кн. 3)
13. **Афендиков А. Л., Давыдов А. А., Луцкий А. Е., Меньшов И. С., Меркулов К. Д., Пленкин А. В., Ханхасаева Я. В.** Адаптивные вейвлетные алгоритмы для решения задач гидро- и газовой динамики на декартовых сетках. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2016. 234 с.
14. **Сухинов А. А.** Построение декартовых сеток с динамической адаптацией к решению // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, № 1. С. 86–98.
15. **Меркулов К. Д., Меньшов И. С.** Динамически перестраиваемые декартовы сетки с локальным измельчением для расчета задач газовой динамики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16 (4). С. 1–11.
16. **Laurmaa V., Picasso M., Steiner G.** An octree-based adaptive semi-Lagrangian VOF approach for simulating the displacement of free surfaces. *Computers and Fluids*, 2016, vol. 131, p. 190–204.
17. **Olshanskii M. A., Terekhov K. M., Vassilevski Y. V.** An octree-based solver for the incompressible Navier – Stokes equations with enhanced stability and low dissipation. *Computers and Fluids*, 2013, vol. 84, p. 231–246.
18. **Aftosmis M. J.** Solution Adaptive Cartesian Grid Methods for Aerodynamic Flows with Complex Geometries. Lecture notes for 28th Computational Fluid Dynamics Lecture Series. Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Belgium, 1997.
19. **Ахо А., Хопкрофт Д. Э., Ульман Д. Д.** Структуры данных и алгоритмы: Учеб. пособие: Пер. с англ. М.: ИД Вильямс, 2000. 384 с.

References

1. **Lukashov O. Y.** Investigation of wave effects arising from the propagation of shock waves in a ramified network of mine workings. Diss. candidate of physico-mathematical sciences. Tomsk, 2003, 141 p. (in Russ.)
2. The charter VGSCH on the organization and conduct of mountain rescue. Moscow, Nedra, 1986, 254 p. (in Russ.)
3. The Charter of the militarized mine-rescue part (VGSCH) on the organization and conduct of mine-rescue work at the enterprises of the coal and shale industry. Moscow, 1997, 201 p. (in Russ.)
4. **Paleev D. Y, Lukashov O. Y., Vasenin I. M., Shrager E. R., Kraynov A. Y., Kosterenko V. N.** Simulation of the propagation of shock waves from an explosion and combustion of a gas-dust mixture in coal mines. *High technology development and use of mineral resources*, 2017, vol. 3, p. 371–377. (in Russ.)
5. Mathematical modeling of combustion and explosion of high-energy systems. Ed. by I. M. Vasenin. Tomsk, 2006, 322 p. (in Russ.)
6. **Paleev D. Y, Lukashov O. Y., Vasenin I. M., Shrager E. R., Kraynov A. Y., Kosterenko V. N.** The damping of the energy of the shock wave by a water barrier in the explosion of a layered accumulation of methane. *High technology development and use of mineral resources*, 2017, vol. 3, p. 385–389. (in Russ.)
7. **Paleev D. Y., Lukashov O. Y., Vasenin I. M., Shrager E. R., Kraynov A. Y., Kosterenko V. N.** The interaction of the shock wave of methane explosions with a cloud of powder inhibitor. *High technology development and use of mineral resources*, 2017, vol. 3, p. 377–381. (in Russ.)
8. **Paleev D. Y, Lukashov O. Y., Vasenin I. M., Shrager E. R., Kraynov A. Y., Kosterenko V. N.** Simulation of aerodynamic processes in the ventilation networks of modern mining enterprises. *Mining Information and Analytical Bulletin* (*scientific and technical journal*), 2015, vol. S7, p. 224–230. (in Russ.)
9. **Vasenin I. M., Kosterenko V. N., Kraynov A. Y., Lukashov O. Y., Paleev D. Y., Shrager E. R.** Gas-dynamic method of calculating non-stationary normal and emergency modes of mine ventilation. *Fire Safety*, 2018, vol. 1, p. 32–41. (in Russ.)
10. **Lukashov O. Y.** On an integrated approach to modeling an emergency in a gas explosion in a coal mine. *Vestnik of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2014, vol. 6 (32), p. 86–93. (in Russ.)
11. **Paleev D. Y., Lukashov O. Y.** The spread of damaging factors of the explosion in the network of mine workings. In: Occupational safety issues in mining enterprises: Collection of scientific papers. Kemerovo, KuzSTU, 2003. (in Russ.)
12. **Paleev D. Y.** Shock waves during explosions in coal mines. In: Industrial Safety. “Mining Engineering” OOO “Cimmerian Center” Publ., 2011, 312 p. (Mining Engineer Library, vol. 6, book 3) (in Russ.)
13. **Afendikov A. L., Davydov A. A., Lutsky A. E., Menshov I. S., Merkulov K. D., Plenkin A. V., Hanhasaeva Ya. V.** Adaptive wavelet algorithms for solving problems of hydro gas dynamics on Cartesian grids. Moscow, IPM named after M.V. Keldysh. 2016. p. 234.
14. **Sukhinov A. A.** Construction of Cartesian grids with dynamic adaptation to a solution. *Mathematical Modeling*, 2010, vol. 22, no. 1, p. 86–98 (in Russ.).
15. **Merkulov K. D., Menchov I. S.** Dynamically tunable Cartesian grids with local grinding for calculating gas dynamics problems. *Journal of Physico-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2015, vol. 16 (4), p. 1–11. (in Russ.)
16. **Laurmaa V., Picasso M., Steiner G.** An octree-based adaptive semi-Lagrangian VOF approach for simulating the displacement of free surfaces. *Computers and Fluids*, 2016, vol. 131, p. 190–204.

17. **Olshanskii M. A., Terekhov K. M., Vassilevski Y. V.** An octree-based solver for the incompressible Navier – Stokes equations with enhanced stability and low dissipation. *Computers and Fluids*, 2013, vol. 84, p. 231–246.
18. **Aftosmis M. J.** Solution Adaptive Cartesian Grid Methods for Aerodynamic Flows with Complex Geometries. Lecture notes for 28th Computational Fluid Dynamics Lecture Series. Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Belgium, 1997.
19. **Aho A., Hopcroft D. E., Ulman D. D.** Data structures and algorithms: A Stud. Manual. Moscow, Williams Publ., 2000, 384 p. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию
Received
25.04.2019

Сведения об авторах

Лукашов Олег Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ООО «ШатхЭксперт-Системы» (пр. Комсомольский 13, офис 4, Кемерово, 650065, Россия)
olukashov@gmail.com

Костромин Дмитрий Александрович, аспирант, Томский государственный университет (пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия)
kd2206@yandex.ru 8-908-942-10-55

Information about the Authors

Oleg Yu. Lukashov, Candidate of Physico-Mathematical Science, LLC ShatkhExpert-Systems (13 Komsomolsky Ave., Kemerovo, 650065, Russian Federation)
olukashov@gmail.com

Dmitriy A. Kostromin, Graduate Student, Tomsk State University (36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation)
kd2206@yandex.ru 8-908-942-10-55