

УДК 621.454

С.Н. ЛАРЬКОВ

*Государственное научно-производственное предприятие «Объединение Коммунар», Харьков, Украина*

## МЕТОД ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ

*Предложен метод отображения результатов моделирования задач механики сплошной среды, обеспечивающий отображение векторного поля с числом компонентов до трех и набора скалярных полей в одном картинном пространстве. Алгоритм метода, использующего цветовое пространство RGB, в котором каждому скалярному полю соответствует свой чистый цвет, построен таким образом, чтобы уменьшить влияние физиологических особенностей зрения на разрешающую способность метода. Разработанный метод цветового кодирования обеспечивает ясность дешифровки, с одной стороны, и возможность кодирования любого диапазона значений на числовой оси, с другой.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, визуализация, цветовое кодирование, отображение, вектор, скалярное поле.

### Введение

Результатами математического моделирования задач механики сплошной среды являются многомерные численные массивы, представляющие собой параметры континуума на некоторой дискретной сетке.

Учитывая, что человек воспринимает порядка 90% информации посредством зрения [1], актуальной является задача представления результатов расчетов в какой-либо визуальной форме.

Широко используемые методы визуализации результатов моделирования основаны на отображении расчетной области в двумерное картинное пространство, причем определенному диапазону скалярных величин ставится в соответствие какой-либо цветовой код.

Расшифровка полученного изображения осуществляется с помощью цветowych шкал, визуализирующих функциональную зависимость между цветом и значением скалярной величины. Несмотря на широту применения, подобные методы обладают рядом принципиальных недостатков:

1. Невозможность кодирования векторных полей.
2. Невозможность кодирования на одном изображении взаимосвязанных скалярных полей (например, концентрация горючего и окислителя).

Обход этих недостатков вносит дополнительные условия в изображение. Например, отображение векторных полей (причем не более чем с 2-мя компонентами) осуществляется в виде изображения векторов в виде стрелок на картинной плоскости, а

численное значение вектора кодируется либо длиной, либо цветом стрелки. При этом для того, чтобы избежать загромождения картинки, отображение векторов осуществляется только для некоторого, обычно незначительного, числа вычислительных ячеек.

Отображение взаимосвязанных скалярных полей, например, массовых концентраций компонентов газовой смеси обычно осуществляется в виде отдельных изображений и вызывает значительные трудности при расшифровке состояния среды в интересующих областях.

### 1. Постановка задачи исследования

Задачей исследования является разработка метода отображения результатов математического моделирования путем построения изображения на картинной плоскости, кодирующего состояние до трех скалярных полей или векторного поля размерностью до 3.

Цветовое зрение человека обладает рядом особенностей, а именно:

1. Значительно большая разрешающая способность по отношению к уровню яркости цвета, чем к цветовому тону и насыщенности.
2. Неравномерность чувствительности глаза в диапазоне длин волн видимого света (наибольшая чувствительность в сине-зеленой областях спектра).

С учетом вышеизложенного, алгоритм должен быть построен таким образом, чтобы уменьшить влияние физиологических особенностей зрения на разрешающую способность метода.

### 1.1. Цветовая кодировка

Проведенные автором исследования опирались на работы проф. А.В. Амброжевича [2], в которых представление скалярных полей осуществлялось в виде цветowych карт с переходом от чисто черного цвета (значение 0), к насыщенному цветовому тону. При этом каждому физическому полю соответствует свой цвет, выбираемый из условий ясности дешифровки (красный – температура, синий – давление).

Получаемые изображения интуитивно понятны (нет цвета – нет поля), но обладают существенным недостатком: отображение отрицательных значений нетривиально. Таким образом, предлагаемые методы цветового кодирования должны обеспечить ясность дешифровки, с одной стороны, и возможность кодирования любого диапазона значений на числовой оси, с другой.

## 2. Описание разработанных алгоритмов

### 2.1. Используемые цветовые пространства

В цветовом пространстве RGB цвет представляется в виде смеси чистых цветовых компонент красного ( $\lambda=620-760$  нм), зеленого (500-560 нм) и синего цветов (450-480 нм).

Метод задания цвета в цветовом пространстве RGB часто называют аддитивным.

С физической точки зрения цветовая система RGB отображает цвет самосветящегося тела и наиболее пригодна для описания цветов, отображаемых, например, на экране ЭЛТ.

Следует отметить, что цветовая система RGB соответствует психофизиологическим особенностям человеческого глаза, в котором существуют как рецепторы, чувствительные к уровню яркости (палочки), так и специфичные клетки, чувствительные к свету с определенной длиной волны (колбочки).

В случае описания цветов поверхностей в отраженном свете широкое распространение получила субтрактивная система CMY, в которой цвет представлен как результат вычитания из белого цвета цветовых компонент голубого (cyan), малинового (magenta) и желтого (yellow) цветов.

Физический смысл цветовой модели CMY заключается в фильтрации падающего белого света на отражающую подложку идеальными светофильтрами, поглощающими лучи в диапазоне красных, зеленых или синих длин волн монохроматического света соответственно.

Взаимное расположение систем RGB и CMY представлено на рис. 1.

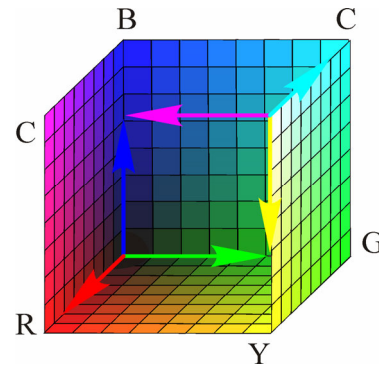


Рис. 1. Расположение пространств RGB и CMY

Для нужд компьютерной графики цвет, отображаемый ЭЛТ, представляются в виде набора трех однобайтных чисел в диапазоне  $0..255$ , соответствующих интенсивности излучения люминофора, таким образом, теоретический цветовой охват системы RGB в ПЭВМ составляет 16,7 млн. цветов, что значительно превышает способность человеческого глаза. Для удобства изложения в дальнейшем цветовое пространство RGB нормируется на 1, и цвета RGB в точке растрового изображения  $A(i,j)$  представляются в виде вектора  $C_{ij}(C_{ij}^1, C_{ij}^2, C_{ij}^3)$ , где компоненты вектора  $C_{ij}^1, C_{ij}^2, C_{ij}^3$  соответствуют интенсивности красного, зеленого и синего цветов соответственно.

Физиологические особенности зрения таковы, что цвета, один из компонент которых равен 1,0, могут быть представлены в виде цветов радуги с определенной длиной волны монохроматического света (за исключением цветов на линии  $(0.5,0,1)-(1,0,1)-(1,0,0)$ , которые не могут быть сведены к монохроматическому свету).

Этот факт послужил основой для представления о т.н. «цветовом круге», в котором расположены цвета радуги с дополнительными цветовым переходом от фиолетового  $(0.5,0,1)$  к красному  $(1,0,0)$  через малиновый  $(1,0,1)$ , а за начало отсчета принят красный цвет (рис. 2).

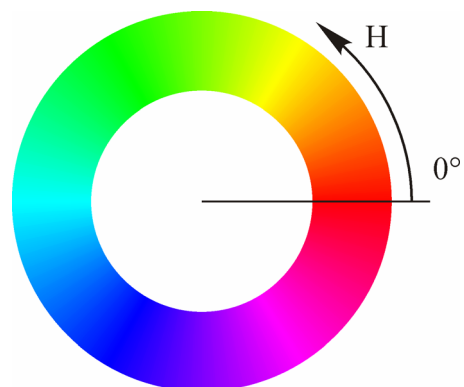


Рис. 2. Схема цветового круга

Следует также отметить, что в человеческом глазе количество клеток, чувствительных к широкому диапазону длин волн, существенно больше, чем клеток, обладающих избирательной чувствительностью к монохроматическому свету. Это обуславливает повышенную разрешающую способность глаза к уровню яркости по сравнению с различиями в цветовом тоне.

Эти факты легли в основу т.н. перцептуальной системы HLS, в которой цветовыми координатами являются оттенок (Hue), яркость (Lightness) и насыщенность (Saturation).

При этом оттенок задается угловой координатой на цветовом круге, а яркость и насыщенность задаются в виде линейных координат.

С учетом того, что по мере снижения или увеличения освещенности глаз теряет способность различать цветовые оттенки, наиболее часто цветовое пространство HLS изображают в виде двух конусов (рис. 3).

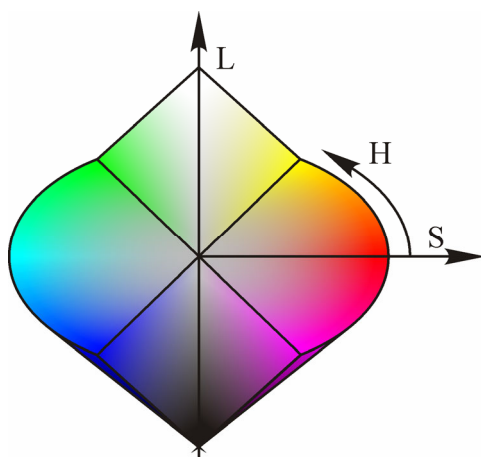


Рис. 3. Схема цветового пространства HLS, соответствующая чувствительности глаза

### 2.2. Отображение скалярных полей

Для отображения набора трех скалярных полей целесообразно использовать цветовое пространство RGB, в котором каждому скалярному полю соответствует свой чистый цвет RGB (рис. 4). В простейшем случае преобразование набора скалярных величин в цвет осуществляется тривиально:

$$C_{ij}^k = \frac{F_{ij}^k - F_{min}^k}{F_{max}^k - F_{min}^k}, \quad (1)$$

где  $i, j$  – экранные координаты точки;

$k$  – индекс скалярного поля;

$C^k$  – компонент цвета RGB;

$F_{ij}^k$  – значение поля в точке;

$F_{max}^k, F_{min}^k$  – экстремумы поля.

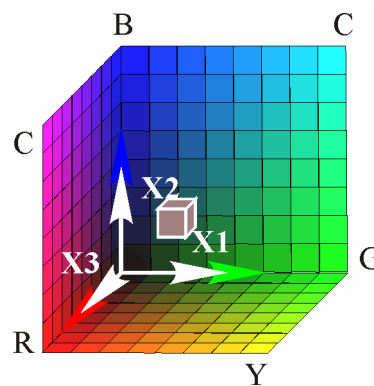


Рис. 4. Схема преобразования, отображающего три скаляра в цвет RGB

В этом случае цветовой охват системы RGB используется наиболее полно, дешифровка интуитивно понятна благодаря тому, что смешение интенсивностей скалярных полей имитируется смешением цветов.

Тем не менее, в некоторых случаях дешифровка изображений, получаемых с помощью такого преобразования, может быть затруднена в связи с необходимостью учета значений экстремумов поля и неопределенностью цветовых координат нулевых значений полей.

Трудности в дешифровке резко возрастают при отображении динамичных картинок.

Для преодоления этих трудностей рекомендуется фиксация нулевых значений скалярных полей в точке черного цвета  $\{0,0,0\}$  для неотрицательного диапазона и в точке нейтрального серого  $\{0.5, 0.5, 0.5\}$  для значений скалярного поля в диапазоне действительных чисел.

В этом случае преобразование набора трех скаляров в цвет RGB может быть представлено следующим образом:

$$C_{ij}^k = \begin{cases} \frac{F_{ij}^k}{F_{max}^k} & |_{F_{min}^k \geq 0} \\ 0,5 + \frac{0,5F_{ij}^k}{\max(|F_{max}^k|, |F_{min}^k|)} & |_{F_{min}^k < 0} \end{cases} \quad (2)$$

При отображении двух скалярных полей, в принципе, может использоваться преобразование (2), при этом один из цветовых компонент фиксируется каким-либо (например, нулевым) значением (рис. 5).

Такое отображение интуитивно понятно благодаря имитации смешения чистых цветов, однако не обеспечивает полного использования повышенной разрешающей способности глаза в уровне яркости по сравнению с цветовым тоном.

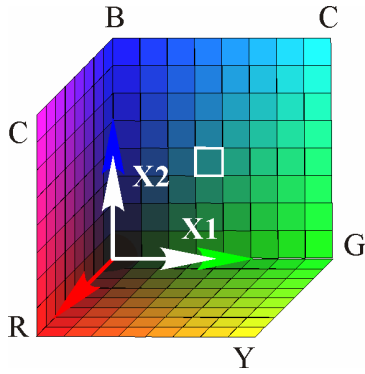


Рис. 5. Схема преобразования, отображающего два скаляра в цвета RGB

Рекомендуется отображение двух скалярных полей осуществлять в цветовом подпространстве, которое включает в себя черную  $Cч(0, 0, 0)$  и белую  $Cб(1, 1, 1)$  точки.

Подпространство фиксируется заданием производящей точки  $T(C^1, C^2, C^3)$  (рис. 6).

В этом случае преобразование, приводящее набор двух скалярных величин в заданной точке картинного пространства в цветовой код системы RGB, может быть представлено в виде:

$$C_{ij}^k = \begin{cases} T^k \frac{F_{ij}^1}{F_{max}^1} + (1 - T^k) \frac{F_{ij}^2}{F_{max}^2} \Big|_{F_{min}^{1,2} \geq 0} \\ \left( 0,5 + \frac{0,5 T^k F_{ij}^1}{\max(|F_{max}^1|, |F_{min}^1|)} \right) \Big|_{F_{min}^{1,2} < 0} \\ \left( 0,5 - 0,5 T^k \frac{F_{ij}^2}{\max(|F_{max}^2|, |F_{min}^2|)} \right) \Big|_{F_{min}^{1,2} < 0} \end{cases} \quad (3)$$

где  $T^k$  – компонент цвета RGB производящей точки;  $F_{ij}^{1,2}$  – значение поля 1 или 2 в точке.

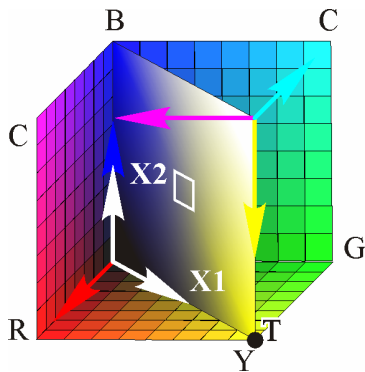


Рис. 6. Схема преобразования, отображающего два скаляра в цвета RGB

В случае отображения одного скалярного поля следует учесть взаимное расположение цветовых

систем RGB и CMY. Задавая одномерное цветовое подпространство с помощью производящей точки  $T(C^1, C^2, C^3)$  в системе RGB, возможно получить и одномерное подпространство, в системе CMY (рис. 7).

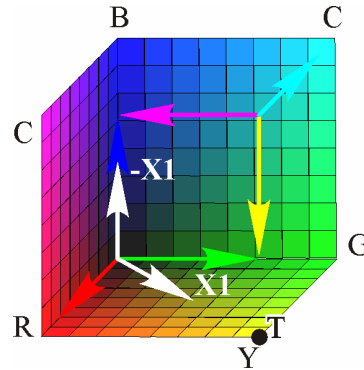


Рис. 7. Схема преобразования, отображающего скалярное поле в цвет RGB

Учитывая, что орты двух систем антипараллельны, цветовая кодировка положительных чисел может осуществляться в системе RGB, а отрицательных – в системе CMY, т.е. дополнительным цветом:

$$C_{ij}^k = \begin{cases} T^k \frac{F_{ij}}{\max(|F_{max}|, |F_{min}|)} \Big|_{F_{ij} \geq 0} \\ (1 - T^k) \frac{|F_{ij}|}{\max(|F_{max}|, |F_{min}|)} \Big|_{F_{ij} < 0} \end{cases} \quad (4)$$

### 2.3. Отображение векторов

Отображение векторного поля с тремя компонентами может быть сведено к отображению набора трех скалярных полей (2) с введением условия равенства масштабов по координатным осям системы RGB:

$$C_{ij}^k = \begin{cases} \frac{F_{ij}^k}{F_{max}^k} \Big|_{F_{min}^k \geq 0} \\ \left( 0,5 + \frac{0,5 F_{ij}^k}{\max(|F_{max}^k|, |F_{min}^k|)} \right) \Big|_{F_{min}^k < 0} \end{cases} \quad (5)$$

где  $F_{max}, F_{min}$  – экстремумы компонент векторного поля.

Для двухкомпонентного векторного поля возможно использовать модифицированное подобным же образом выражение (3):

$$C_{ij}^k = \begin{cases} T^k \frac{F_{ij}^1}{F_{\max}} + (1 - T^k) \frac{F_{ij}^2}{F_{\max}} & |_{F_{\min} \geq 0} \\ \left( 0,5 + \frac{0,5 T^k F_{ij}^1}{\max(|F_{\max}|, |F_{\min}|)} \right) & \\ + \left( 0,5 - 0,5 T^k \frac{F_{ij}^2}{\max(|F_{\max}|, |F_{\min}|)} \right) & |_{F_{\min} < 0} \end{cases} \quad (6)$$

Используя цветовое пространство HLS, возможно построить преобразование, связывающее вектор в полярной системе координат  $a(r, \varphi)$  с цветом в системе HLS:

$$\begin{cases} H = \varphi_{ij}; \\ L = S = r_{ij} / r_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Преобразование (7) обеспечивает повышенную разрешающую способность по направлению вектор-

ного поля и может быть использовано для визуализации полей скорости.

### Выводы

Разработаны методы визуализации результатов моделирования задач механики сплошной среды, обеспечивающие:

1. Отображение векторного поля с числом компонентов до 3.
2. Отображение набора скалярных полей.

### Литература

1. Назарьев В.В. Цвет: компьютерная обработка цветных изображений / В.В. Назарьев. – М.: ЭЛКОМ, 1996. – 128 с.
2. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях / А.В. Амброжевич. – Х.: ХГАДТУ, 1999. – 77 с.

Поступила в редакцию 9.06.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## МЕТОД ВІДОБРАЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ ЩІЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

*С.М. Ларьков*

Запропоновано метод відображення результатів моделювання задач механіки щільного середовища, що забезпечує відображення векторного поля з числом компонент до 3 та набору скалярних полів у одному картинному просторі. Алгоритм методу, що використовує колірний простір RGB, в якому кожному скалярному полю відповідає свій чистий колір, побудований так, щоб зменшити вплив фізіологічних особливостей зору на роздільну здатність методу. Розроблений метод колірного кодування забезпечує ясність дешифровки, з одного боку, і можливість кодування будь-якого діапазону значень на числовій осі, з іншою.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, візуалізація, колірне кодування, відображення, вектор, скалярне поле.

## THE METHOD OF OF COMPLEX MATHEMATIC MODEL OF THE PULSEJET WITH EJECTOR THRUST AUGMENTOR

*S.N. Larkov*

The method of computation fluid dynamics results display described. The 3-components vector fields and 3 scalar fields can be plotted in one imaging area. The algorithm of method, using colour space of RGB, in which the clean color corresponds every scalar field, is built so that to decrease influencing of physiological features of sight on settling ability of method. The developed method of the colour encoding is provided by the clarity of decoding, from one side, and possibility of encoding of any range of values on a numerical axis, with other.

**Keywords:** numeral design, visualization, colour encoding, reflection, vector, scalar field.

**Ларьков Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, главный технолог, ГНПП «Объединение Коммунар», e-mail: sergelarkov@mail.ru.