

УДК 621.744.072.2: 678.746.22-404.8

Дорошенко В. С.

**ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СТРУКТУР ПРИРОДЫ КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

«Всякое искусство есть подражание природе.»

Сенека Луций Анней (Младший)

Современное литейное производство ориентируется на существенное снижение металлоемкости изделий. В свете этой тенденции наблюдается динамичное распространение в мировой практике способа литья по газифицируемым моделям (ЛГМ-процесс), при котором пенопластовая модель в форме из сухого песка замещается расплавленным металлом и образует высокоточную отливку.

Исключительная легкость обработки пенопластов, особенно с совершенствованием и удешевлением 3-D фрезеров (от настольных до с габаритами свыше 6 м), дает возможность такому фрезеру с ЧПУ вырезать из плит пенопласта практически любую конструкцию модели для ЛГМ, которая изображена на экране монитора компьютера. С другой стороны, для упаковочной промышленности создана большая гамма высокопроизводительных пластавтоматов для получения различных тонкостенных пенопластовых изделий.

Также в направлении ЛГМ литейщики постоянно расширяют свои возможности, примером чего могут быть проведенные в Германии работы по изготовлению стальной пены литьем по пеномоделям в песчаных формах. В отчете за 2005 г. института IFAM (Dresden) показано, что по пенополиуретановой пене с открытыми порами размерами до 2,5 мм, которая служила выжигаемой моделью (рис. 1, а), получили литьем стальную пену (рис. 1, б) и трубчатые теплообменники со стальной пеной (нержавеющая сталь 316L) с ячейкой размером 20 ppi (рис. 1, в) [1].

В этих работах отмечается, что ячеистые материалы расширяют существующий спектр свойств, так как они на ~50–90 % легче компактных материалов, а стальная пена имеет минимальную пористость ~80 % и высокую для данного уровня пористости конструкционную прочность и жесткость. Такие материалы имеют потенциал для применения как несущие, армирующие, изолирующие, ограждающие, демпфирующие удары конструкции. Они применимы как арматура и каркасы для сверхлегких конструкций в строительстве, для композиционных материалов в том числе для авиакосмических аппаратов, для очистки газов, жидкостей, глушителей шума, взрыво- и пламяпреградителей,

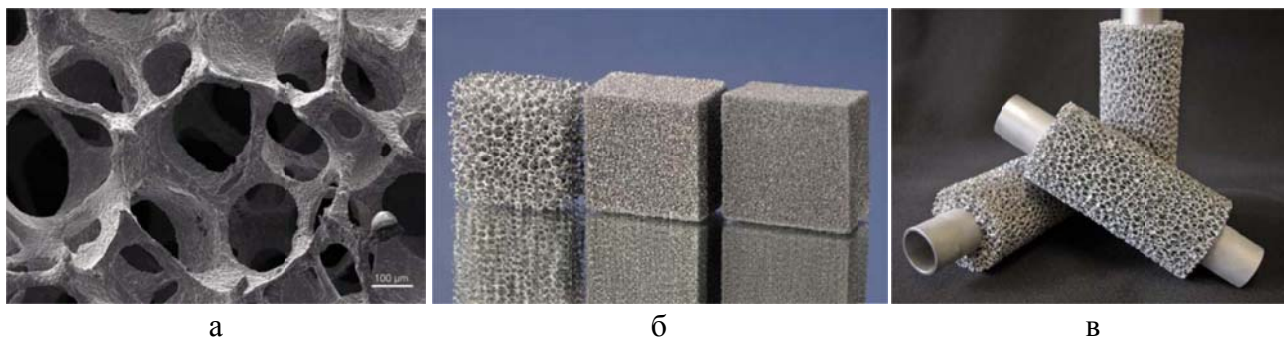


Рис. 1. Примеры разработок немецких ученых:

а – пенополиуретановая пена со сквозными порами (увеличено), размер ячейки до 2,5 мм; б – образцы литой пены из нержавеющей стали 316L с размером ячейки 20, 45 и 60 ppi; в – трубчатые теплообменники со стальной пеной (сталь 316L, ячейка шириной 20 ppi).

адсорбционных, акустических, отопительных, теплообменных устройств, элементов источников тока, катализаторов, электродов заземления и др. Однако, промышленное использование полиуретановой пены [1–2] в качестве модели с размером пор не выше 2,5 мм ограничивает размеры получаемой металлической пены как ячеистого материала, кроме того, на ней трудно стабильно получать одинаковые функциональные свойства (проницаемость двух одинаковых образцов различна).

Если свойства пенопласта позволяют изготовить практически любую модель, то какой же конфигурации можно получить отливку?

Целью работы являлась разработка новой концепции получения легковесных ячеистых отливок и примеров изготовления их пенопластовых моделей с намерением расширить область применения литейных технологий на базе современного развития естественных и технических наук. Специалисты научной школы под руководством профессора Шинского О. И. в институте ФТИМС НАН Украины научную проблему сформулировали в виде такого вопроса: «какие твердотельные конструкции могут оптимально заполнить пространство, разместиться и «пролиться» в объеме песка литейной формы при ЛГМ?» [2].

На что первыми ответами послужили конструкции, наблюдаемые в живой и неживой природе, а также модели строения структур органических и неорганических веществ как их представляет современное естествознание. Главное отличие предложенных человеком инженерных конструкций от созданных природой состоит в высокой энергоэффективности последних, а также во многих случаях в наличии таких характерных свойств, как повторяемость в различных направлениях одинаковых элементов, комбинаторность (фрактальность) и ячеистость. В частности, применение в технических устройствах принципов организации, свойств, функций и структур живой природы изучается бионикой.

Однако, в основу конструирования, то есть создания прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта, могут быть положены не только образы естественной природы, но и воображаемые, идеальные (например, математические) модели, в общем случае не обязательно на сегодня обнаруженные в физическом мире. Модели могут быть дополнены крепежными или технологическими деталями или «улучшены» с учетом технологичности для конкретных видов производства.

Обращая внимание на структуры органической и неорганической природы, мы видим их преимущественно ячеистое строение. А можно ли скопировать в пенопласте такое строение, например, конструкцию в виде структуры пространственных решеток, по аналогии с изображением кристаллических решеток из учебника кристаллографии (рис. 2)? Пенопласт показал свою прекрасную пригодность для изготовления модели с размером ячейки до полуметра, в модели участки между узлами ячеек заполнили перемычками (перегородками), а сами узлы стали служить соединениями или скрещиваниями перемычек.

Для кристаллических решеток по канонам кристаллографии характерна трехмерная периодичность, определив структуру одной элементарной ячейки, можно построить всю решетку. Модель участка двумерной «сетки» таких решеток с одним рядом вертикальных перемычек удобно выполнять в пресс-форме на пластавтомате. При этом получают элементы одной конструкции, из которых путем склеивания в стопке набирают пространственную решетчатую конструкцию. Размеры пор или отверстий получаемого литого материала могут быть до десятков и более миллиметров.

Для моделей литого ячеистого материала, составленного из плоских решеток, применяют все требования литейной технологии, что не составляет труда выполнить литье.

Пример такой модели (рис. 2) показан в виде пространственной решетки, где есть одинаковые элементарные три детали – перемычки 1, 2 и 3, которые по канонам кристаллографии обозначаются буквами *a*, *b*, *c*. Они составляют элементарную ячейку как трехмерное образование, углы между ними обозначаются  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Путем продолжения одного из рядов перемычек выполнен выпор 4. При последующей засыпке песком

в литейной форме может быть установлен пористый трубопровод 5 для вывода газов, ряд утолщенных перемычек может служить шлакоуловителем 6 в литниковой системе, а другой ряд утолщенных перемычек – стояком 7 (место установки литейной воронки показано пунктиром).

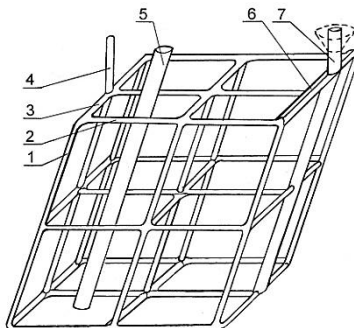


Рис. 2. Модель пространственной решетки:

1, 2, 3 – перемычки а, в, с; 4 – выпор; 5 – пористый трубопровод; 6 – шлакоуловитель; 7 – стояк.

Изображать внутреннюю структуру кристалла в виде пространственной сетки, узлы которой совпадают с центрами частиц в кристалле (то есть решетками), начал с 1848-го года О. Браве. Он предложил 14 решеток Браве, которые легли в основу кристаллографии и отличаются одна от другой набором элементов симметрии, или сингонией, и типом центрирования. Эти 14 типов структур не исчерпывают всего многообразия пространственных решеток в кристаллографии, однако принцип копирования таких решеток лег в основу новой технологии ячеистого литья, в данном случае наследующего структуру кристаллов.

При изготовлении модели решетки, подобной изображению на рис. 2, повторяющиеся элементы из пенополистирола получают спеканием в пресс-форме или вырезанием из блока. Такое выполнение модели гарантирует получение сквозных пор или полостей, которые заполняют сухим песком при формовке. Для изготовления монолитного участка или стенки в заданном месте пористой модели этот участок или несколько перемычек обматывают синтетической пленкой, предотвращая доступ песка в эту зону модели, заполняемую впоследствии металлом. Каждая из пор литого материала, полученного по таким моделям, имеет точные стабильные размеры, форму, пространственную ориентацию в материале, периодичность повторения, толщины стенок и перемычек (в отличие от полиуретановой пены), поскольку модель выполняется по чертежам и изготавливается в чаще всего в точной металлической пресс-форме предпочтительно на пластавтоматах. Расширению служебных свойств материала будет способствовать, например, введение в его поры при сборке модели вставок из другого материала, которые остаются в литой конструкции. Полости и перемычки литого материала могут выполняться различных размеров и форм, с разным их чередованием. Прочностные характеристики материала будут иметь некоторую корреляцию с параметрами кристалла, кристаллическая решетка которого копируются, а металл литых тонких (3–8 мм) перемычек, как правило, в 1,2–1,4 раза прочнее, чем толстостенных (15–40 мм), из-за образования в тонких телах преимущественно мелкозернистой структуры.

В отдельных случаях, во избежание образования трещин от напряжений, вызванных усадкой металла, некоторые или все перемычки литого материала могут выполнять криволинейными, например S-образными, а стенки неплоскими. Такое «улучшение структуры» копируемых природных конструкций при создании наших материалов повышает служебные свойства последних, когда важно достичь большой удельной площади поверхности при применении их для электродов, теплообменников, катализаторов, и т. п.

Для сборки нескольких литых каркасных деталей в одну конструкцию на свободных концах перемычек этих деталей могут быть выполнены литьем средства монтажа либо предусмотрена возможность сваривания, в том числе, с изделиями из проката. А литейную модель фасонного изделия из ячеистых материалов можно формировать при ее сборке из элементов, либо вырезать из собранного ячеистого пенопластового блока, например, ни хромовой проволокой.

Оптимизация пространственных литых конструкций и размещения одноразовых моделей в объеме песка – один из резервов новых возможностей, свойственных «объемной» формовке при ЛГМ, в отличие от формовки с плоскостью разъема в парных опоках, присущей традиционным видам литья, для которых рассматриваемые в этой статье конструкции отливок будут отвергнуты как нетехнологичные. Это преимущество ЛГМ прежде всего используют для мелких отливок при сборке одноразовых моделей из элементов в стопки или «кусты» с одновременным формированием коллектора литника как несущей конструкции, чем в 1,5–2 раза увеличивают металлоемкость формы.

С целью повышения качества и служебных возможностей пространственных отливок, а также отливок, заливаемых в виде блоков или «кустов», предложено модельные конструкции собирать по принципу ботанического явления филлотаксиса (буквально – листорасположения) [3]. Это явление изучает раздел морфологии растений, согласно данному признаку листья размещаются на стебле в строго заданной последовательности. Наиболее распространен спиральный филлотаксис с одним листком на узле, когда одинаковый угол между соседними листками, близкий к значению  $137,5^\circ$ , создает структуру, когда ни один листок не затеняет других. При этом природные, созданные из повторяемых элементов симметричные структуры, в которых четко прослеживаются числовые закономерности [4], подтверждают слова В. И. Вернадского о неевклидовой геометрии живой природы [5].

На рис. 3 показан пример модели в виде отдельных элементов 1 (или моделей отдельных деталей), закрепленных на стояке 2 (коллекторе литника). Стояк 2 и элементы 1 выполняются из пенопласта. Модель на рис. 3 может представлять конструкцию, которую в литом виде используют целой, например, как армирующую, или быть блоком из отдельных закрепленных на стояке деталей, которые после отливания из металла отделяют от стояка. Воронка стояка показана пунктиром. Подобно образованию в пространстве листовой мозаики, призванной улавливать растением как можно больше света, наиболее рациональное размещение модельных элементов 1 (рис. 3), как в целостной пространственной конструкции, так и деталей на коллекторе, позволит равномерно расположить элементы модели в вакуумируемом песке формы. Равномерность вакуумирования повысит качество отливок при улучшении режима эвакуации из формы продуктов газификации моделей, оптимизирует газовое давление, как в песке, так и над зеркалом металла во время его заполнения формы, уменьшит вероятность образования дефектов при скоплении углеродсодержащих продуктов на полученной отливке. Охлаждение равномерно размещенных в объеме песка отливок или их частей также способствует повышению стабильности их свойств.

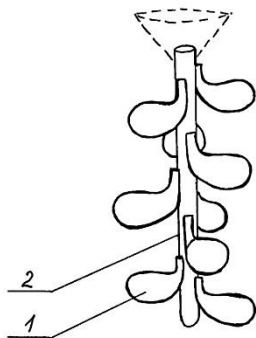


Рис. 3. Модель, построенная по принципу филлотаксиса:  
1 – элемент (модель детали), 2 – стояк (коллектор литника)

Возвращаясь к теме литья сотовых металлических пространственных структур в виде крупноячеистой пены, включая изготовление подобных пене материалов с регулируемой структурой и свойствами, рассмотрим конструкцию модели для них из повторяемых элементов, разработанную во ФТИМС. В этой конструкции использованы геометрические правила, описанные бельгийским ученым Ж. Плато и определяющие структуру пены как самопроизвольно образуемой природной структуры [6].

На рис. 4 показан пример участка литейной одноразовой (пенополистироловой) модели подобной типичной ячейке монодисперсной пены в виде многогранника пентагонального додекаэдра (рис. 5, 6) с открытыми сквозными полостями 1, расположенными в каркасе из ребер 2 этих ячеек. Эта ячейка модели аналогична мелкоячеистой модели из пенополиуретана (рис. 1, а). Ребра представляют собой взаимосвязанную систему, в которой в одной точке 3 сходятся по четыре ребра. Если в каждом ребре многогранника-ячейки пены сходятся три пленки, углы между которыми равны и составляют  $120^\circ$ , то при построении модели в базовом варианте на гранях многогранника пленку не выполняют, оставив одни ребра и получив из них каркас.

Согласно правилам Плато ребра представляют собой взаимосвязанную систему, пронизывают весь каркас пены и при схождении четырех ребер в одной точке образуют по всей пене одинаковые углы  $109^\circ 28'$ . Площадь поперечного сечения треугольного ребра (канала Плато) определяется как  $S = r^2(3^{1/2} - \pi/2)$ , где  $r$  – средний радиус пузырька газа (в наших расчетах – шара, вписанного в многогранник-ячейку модели).

На рис. 5 показан пример повторяющегося элемента для сборки каркаса из треугольных ребер с использованием соединения «шип-паз», шип 1 и паз 2. Этот элемент, как и другие, части модели может быть выполнен из пенополистирола, других пористых пенопластов, льда, парафина и других материалов для удаляемых одноразовых литейных моделей. Для засыпки формовочного песка, по крайней мере, одно отверстие пятиугольного сечения в каждом или в некоторых из ячеек выполняют открытым, а остальные или, по крайней мере, одно при сборке модели могут закрывать пластинами 3 или пленками, расположенными между угловыми ребрами треугольных в сечении ребер. На рис. 5 рядом с элементом – ребром показана плоская пластина 3, которая крепится к ребрам и закрывает пятиугольное отверстие (грань ячейки) или может быть выполнена для использования в качестве шаблона, вокруг которого смыкаются в пятиугольник ребра. В торце пластина 3 может иметь по периметру клинообразную борозду, по которой удобно ориентировать ребра или крепить ее к ребрам, а также может иметь отверстие 4 круглой или дугой формы и в заданном количестве. Аналогично пластине может использоваться пленка для закупоривания пятигранного отверстия.

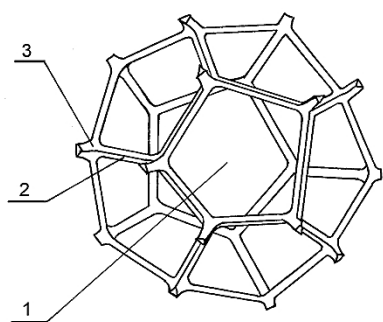


Рис. 4. Модель в виде пентагонального додекаэдра: 1 – открытые сквозные полости; 2 – ребро; 3 – точка соединения четырех ребер.

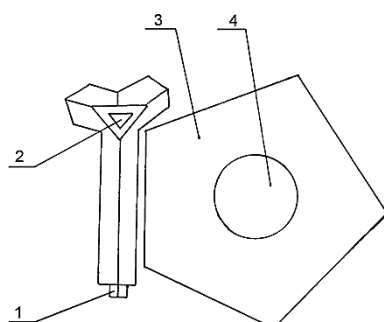


Рис. 5. Повторяющийся элемент модели для сборки каркаса ребер: 1 – шип; 2 – паз.



Рис. 6. Обложка журнала Nature, 9 October 2003, vol. 425.

Таким выборочным закрыванием граней при сборке модели можно регулировать проницаемость конструкции. Если требуется продуть, например, воздухом ячеистую конструкцию в одном прямолинейном направлении (а в других направлениях проход не желателен), то по две (противоположные) грани в каждой ячейке, имеющие в этом направлении наибольшее проходное сечение, должны быть открытыми, а все остальные закрытыми. Полным или частичным закрыванием отдельных граней можно создавать различную траекторию движения вещества в порах ячеистого материала. Причем закрываться грани ячеек могут пластинками из металла, частично вставленными в тела ребер модели. После заливки и замещения металлом модели или полости от модели металл ребер охватывает металл пластинок или сплавляется с ним.

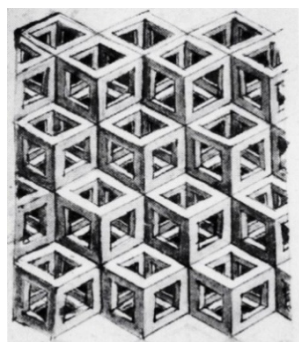
Завершая тему о пеноподобных конструкциях, отметим, что на рубеже XX–XXI веков было сделано важное открытие в области экспериментальной астрофизики. Результаты наблюдений, многие месяцы, кропотливо накапливавшиеся космическим спутником WMAP, свидетельствовали в пользу того, что Вселенная может иметь форму додекаэдрического пространства Пуанкаре [7]. Или, другими словами, Вселенная может представлять собой набор бесконечно повторяющихся додекаэдров, как показано на рис. 6 из иллюстрации к статье в журнале Nature [8], вынесенной на титульную страницу номера этого журнала. Если данные свидетельствуют, что галактики обладают пеноподобной структурой, то и конструкторам следует «взять на вооружение» подобные конструкции, которые удобно получать из металлов процессами литья.



Рис. 7. Модель детали колосника печи



Рис. 8. Решетки ливнеприемников и канализационных систем, которые льют в стопках



Leonardo da Vinci, *Struttura tridimensionale*

Рис. 9. Рисунок Леонардо да Винчи

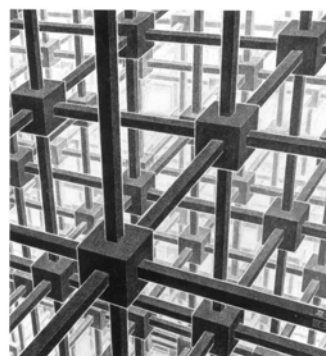


Рис. 10. Рисунок художника Эшера

Предложенные новые модельные конструкции из элементов допустимых размеров от нескольких до сотен миллиметров и более с возможностью получения их деталей на пластавтоматах упростят конструирование ячеистых материалов, которые обычно называют материалами будущего и в описанном случае подобны пенным конструкциям, в том числе твердой пене с регулируемой структурой. На фотографии (рис. 7) в качестве примера применения пористых отливок показана модель кольцеобразной детали диаметром

около 600 мм, которая имеет сквозные отверстия конусной формы по всему своему телу, тем самым представляя собой, относительно простой вариант пористой конструкции. Диаметры одинаковых конусных отверстий имеют размеры: максимальный 5 мм, минимальный 2 мм. Эта деталь служит колосником промышленной печи для сжигания сухой соломы и камыша как альтернативных источников энергии. Отливание таких деталей другими способами, кроме ЛГМ, со сравнимой экономичностью, практически невозможно.

На рис. 8 показана слева решетчатая конструкция отливки, которую удобно собирать в пространственную решетку из моделей, 4 модели из пенополистирола показаны справа. Такую отливку из легированного чугуна получают в виде единой стопки решеток из десятка штук, стопка имеет высокую жесткость и дает при литье стабильные размеры отдельных плоских решеток, а также оптимально заполняет литейную форму по объему до максимального числа отливок в ней. Затем стопку разрезают на отдельные плоские решетки, которые служат решетками ливнеприемников и канализационных систем.

Пространственные решетчатые конструкции имеют «магнетическую способность» притягивать внимание многих конструкторов и архитекторов. Может быть, для того и рисовали еще Леонардо да Винчи (рис. 9), а также голландский художник – график Мауриц Эшер (рис. 10) свои «забавляющие» воображение пространственные решетки, чтобы мы могли разработать технологию их изготовления, причем наиболее пригодным из многих способов создания конструкций является литье способом ЛГМ, обладающее возможностью «объемной» формовки.

## ВЫВОДЫ

Ячеистые пространственные материалы и фасонные отливки, полученные ЛГМ-процессом, расширят существующий спектр свойств по сравнению с компактными материалами. А литые решетчатые материалы, в частности, аналоги которых взяты из макро- и микромира живой и неживой природы, из сборных модельных элементов упростят конструирование и позволят наладить выпуск ячеистых материалов и каркасных легковесных изделий, которые часто называют «материалам будущего». Ранее учеными нашего отдела был разработан способ литья рассмотренных решетчатых материалов в непрерывном режиме [9]. Также и ЛГМ по его потенциалу можно отнести к технологиям будущего, особенно полезных для немногочисленных стран с замкнутым металлургическим циклом, среди которых находится Украина, получающих металл из собственных руд и способных перевести его в высокотехнологичный наукоемкий товар в виде машин и механизмов. Развитие подобных технологий открывает пути заимствования известных нам конструктивных закономерностей природных материалов не только для их копирования, но и для получения новых материалов и конструкций, в природе не существующих.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стальная пена с открытыми порами – изготовление и свойства / Моуала Х. [и др.] – Металлургия машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 29–33.*
2. *Дорошенко В. С. Способы получения каркасных и ячеистых литых материалов и деталей по газифицируемым моделям / В. С. Дорошенко – Литейное производство. – 2008. – № 9. – С. 28–32.*
3. *Патент Украины 83447, МПК В22С7/00, В22С 9/00. Литейная одноразовая модель / Шинский О. И., Дорошенко В. С. – Оубл. 2008, Бюл. № 13.*
4. *Боднар О. Я. Геометрия филлотаксиса / О. Я. Боднар – Доклады АН Украины. – 1992. – № 9. – С. 9–14.*
5. *Вернадский В. И. Размышления натуралиста. Пространство и время в неживой и живой природе / В. И. Вернадский – М.: Наука. - 1975. – 220 с.*
6. *Патент Украины 87782, МПК В22С 7/00. Литейная одноразовая модель / Шинский О. И., Дорошенко В. С. – Оубл. 2009, Бюл. № 15.*
7. *J.-P. Luminet. A cosmic hall of mirrors // Physics World, September 2005. – P. 23–28.*
8. *J.-P. Luminet. A finite dodecahedral Universe // Nature, 9 October 2003, vol. 425. – P. 593–595.*
9. *Патент России 2029653, МПК В22С 9/02. Способ непрерывного литья / Дорошенко В. С., Шейко Н. И. – Оубл. 1995, Бюл. №6.*

Статья поступила в редакцию 12.03.2014 г.