



*The neuronet algorithms, allowing to estimate the degree of similarity of two castings by space distribution of material, are offered. The possibility of application of the developed algorithms for solving of problem of primary choice of the casting gating system on the stage of projecting is shown.*

А. Н. ЧИЧКО, Ю. В. ЯЦКЕВИЧ, В. Ф. СОБОЛЕВ, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 629.113

## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВЫБОРА НАЧАЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОТЛИВОК С ЦЕЛЬЮ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Одним из наиболее перспективных путей ресурсосбережения в литейном производстве, не требующем серьезных капиталовложений, является проектирование оптимальных, с точки зрения их массы и качества отливки, литниковых систем. Для решения этой проблемы, имеющей важное практическое значение, в Белорусском национальном техническом университете разрабатываются алгоритмы и программы, позволяющие оптимизировать технологию изготовления отливок [1–4]. Однако эти программы в качестве исходных данных используют заданную технологом литниковую систему, которая «проверяется» расчетом на предмет технологичности, т. е. необходимо начальное приближение литниковой системы. Чтобы выбрать начальное приближение литниковой системы для отливки, необходимы новые алгоритмы и программные средства, которые в настоящее время отсутствуют на литейных предприятиях.

Цель настоящей статьи – разработка алгоритмического обеспечения для решения задач по выбору литниковых систем на основе обучающей нейронной сети, построенной на базе данных по технологии предприятия.

Известно, что от конфигурации литниковой системы и ее положения по отношению к отливке зависит расход металла и энергоносителей, которые, в конечном счете, определяют себестоимость литейной продукции. Повышенный расход металла и энергоносителей на литниковую систему приводит к снижению конкурентоспособности литейной продукции. К тому же известно, что от выбора литниковой системы для отливки зависят такие виды брака отливок, как усадочная пористость раковины, засор, недолив спаи. Уровень этих дефек-

тов, в конечном счете, определяет экономические показатели производства отливок на литейном предприятии. Следует отметить, что работающие в условиях производства литниковые системы часто далеки от оптимальных по как по массе, так и по условиям заполнения металлом формы, что существенно влияет как на качество получаемой отливки, так и увеличивает ее себестоимость. Таким образом, от выбора литниковой системы зависит рентабельность работы предприятия.

В настоящее время теория, позволяющая выбирать начальное приближение литниковых систем по заданным наборам признаков, находится в стадии разработки и поэтому предлагаемые методы часто носят частный не универсальный характер и справедливы для определенных условий, т. е. разработка алгоритмов и методов, позволяющих классифицировать отливки различного назначения, является актуальной и от ее решения зависит качество технологических решений, принимаемых при разработке технологического процесса. Как следствие, на промышленных предприятиях практически отсутствуют программные средства, позволяющие, используя методы классификации, выбирать оптимальную литниковую систему.

Решение задачи классификации и выбора литниковой системы можно проводить с использованием методов нейронных сетей. При классификации отливок нейронная сеть обучается по важнейшим их признакам, таким, как характеристики геометрии отливки, особенности охлаждения отливки и т. д. В процессе обучения выделяются признаки, отличающие отливки друг от друга, которые и составляют информационную базу для принятия решений об отнесении отливок к соответствующим

классам. Информация о каждой отливке представляется в виде вектора конструкторско-технологических признаков, как наиболее полно и достоверно отвечающее требованиям нейросетевого моделирования. Признаки отливок определяем посредством анализа ее твердотельной модели и чертежа на основе различных стандартов. Таким образом, эти методы позволяют на основе эмпирической информации, в данном случае заводской и промышленно апробированной, выбирать литниковые системы, которые в дальнейшем оцениваются экспертными системами, о которых пойдет речь ниже. В работах [5–9] приведены основы методов нейросетевого программирования, которые были генератором настоящей статьи.

Таким образом, проблема автоматизированного выбора литниковых систем на основе задач классификации и кодирования объектов типа «отливка – литниковая система» является актуальной, так как от ее решения зависит уровень автоматизации технологической подготовки производства, а также уровень качества отливок и материальные затраты на их производство.

Бесконечное разнообразие геометрических форм изготавливаемых отливок и технологических параметров литья (марки стали, температура заливки и др.) приводит к невозможности формализации и аналитического решения данной задачи. Невозможно даже формализовать критерии оптимальности результата решения задачи, поскольку для изготовления конкретной отливки могут с близкой эффективностью использоваться разные литниковые системы. Кроме того, приемлемое решение чаще всего является компромиссом между расходом металла, качеством отливки, сложностью изготовления литниковой системы и др. Для различных отливок требования к качеству и расходу металла могут быть разными. Например, может допускаться некоторый уровень пористости в определенной области отливки (некритичной к физическим нагрузкам) при значительной экономии металла в литниковой системе.

На практике успешность проектирования литниковой системы в большой степени зависит от интуитивного выбора и опытности проектировщика. Он чаще всего принимает решение, сравнивая целевую отливку с успешно изготовленными им ранее, и проектирует целевую литниковую систему по аналогии с вариантом, соответствующим наиболее похожей отливке.

Поэтому основная идея настоящей работы состоит в автоматизации выбора литниковой системы для изготовления целевой отливки из уже имеющихся вариантов, ранее использованных литни-

ковых систем, путем сравнения соответствующих им отливок (прототипов) с целевой отливкой. Основные задачи, решаемые в данной работе:

1) формализация критериев и правил оценки степени схожести двух отливок (целевой и ранее изготовленной) с точки зрения использования аналогичной литниковой системы;

2) разработка алгоритма и компьютерной программы, производящей интегральную оценку возможности использования аналогичной литниковой системы для двух отливок;

3) разработка программы для создания и наращивания компьютерной базы данных, успешно изготовленных отливок (прототипов) и соответствующих им вариантов литниковых систем;

4) разработка алгоритма поиска в базе данных нескольких прототипов, наиболее близких к целевой отливке, и выдачи соответствующих им литниковых систем.

Таким образом, одним из результатов выполнения данной работы является программное обеспечение для создания и наращивания компьютерной базы данных успешно изготовленных отливок (шаблонов) и соответствующих им вариантов литниковых систем, а также поиска в этой базе вариантов литниковых систем, наиболее подходящих для изготовления конкретной (целевой) отливки. Эта программа позволит в некоторой степени компенсировать возможный недостаток опыта проектировщика литниковых систем и не позволит некоторым возможным вариантам проектируемой литниковой системы ускользнуть от внимания проектировщика.

Предполагается следующая общая методика выбора (проектирования) литниковой системы для изготовления целевой отливки:

1) с помощью какой-либо компьютерной системы трехмерного проектирования («ProEngineer», «SolidWorks»,...) создается файл в формате «\*.stl», в котором содержится трехмерное описание геометрической формы отливки (набор треугольников в трехмерном пространстве, аппроксимирующих поверхность отливки);

2) файл отливки передается в разработанную систему, которая отыскивает в имеющейся базе данных несколько наиболее близких вариантов отливок и выдает в качестве результата соответствующие им литниковые системы вместе с оценками возможности их использования для изготовления входной отливки;

3) проектировщик литниковой системы выбирает наиболее подходящий, по его мнению вариант, и, если требуется по традиционным методикам вносит какие-либо изменения с учетом специ-

фики целевой отливки и геометрических различий между целевой отливкой и подобранным прототипом;

4) после изготовления и успешной апробации спроектированной таким образом литниковой системы эта литниковая система и исходная отливка вносятся в базу данных для дальнейшего использования данного решения в качестве прототипа при разработке других литниковых систем.

**Алгоритм оценки степени подобия двух отливок с точки зрения использования близких по типу литниковых систем**

Основной задачей данной работы является разработка эффективного алгоритма для оценки степени схожести (сравнения) двух отливок с точки зрения использования одинаковых литниковых систем для их изготовления. Эта задача делится на две подзадачи.

Первая подзадача состоит в определении некоторых общих параметров (макропараметров) двух отливок, таких, как габаритные размеры и масса (или объем), и определении критериев и правил вычисления на их основе оценки степени схожести этих отливок. Вторая подзадача состоит в разработке алгоритма оценки схожести двух отливок на основе сравнения распределения их массы по геометрическому пространству. Оценки, получаемые по первому и второму алгоритмам, приводятся к одной интегральной оценке, позволяющей судить о степени пригодности одной и той же литниковой системы для изготовления двух отливок.

Такое разделение на подзадачи обусловлено инвариантностью в некоторых пределах массы и габаритных размеров по отношению к геометрической форме отливок, т. е. если отливки имеют одинаковую геометрическую форму, но разные размеры (одна является уменьшенной копией другой), то для них естественно использовать одинаковые по форме, но разные по размеру литниковые системы. Но эта инвариантность сохраняется лишь в некоторых пределах соотношения геометрических размеров. Например, при двукратном соотношении размеров отливок использование одинаковых литниковых систем уже сомнительно, а при четырехкратном в большинстве случаев – абсурдно.

Исходное описание геометрической формы отливки («\*.stl»-файл) представляет собой список трехмерных координат вершин треугольников, аппроксимирующих поверхность отливки:  $[(x_{00}, y_{00}, z_{00}), (x_{01}, y_{01}, z_{01}), (x_{02}, y_{02}, z_{02})], [(x_{10}, y_{10}, z_{10}), (x_{11}, y_{11}, z_{11}), (x_{12}, y_{12}, z_{12})], \dots, [(x_{N0}, y_{N0}, z_{N0}), (x_{N1}, y_{N1}, z_{N1}), (x_{N2}, y_{N2}, z_{N2})]$ , где  $N$  – общее количество треугольников, используемых для представления поверхности отливки. Поэтому определение габарит-

ных размеров отливки сводится к нахождению разности между максимальной и минимальной координатой среди всех вершин по трем координатным направлениям:

$$L_x = \max_{i=0, \dots, N}(x_{i0}, x_{i1}, x_{i2}) - \min_{i=0, \dots, N}(x_{i0}, x_{i1}, x_{i2}),$$

$$L_y = \max_{i=0, \dots, N}(y_{i0}, y_{i1}, y_{i2}) - \min_{i=0, \dots, N}(y_{i0}, y_{i1}, y_{i2}),$$

$$L_z = \max_{i=0, \dots, N}(z_{i0}, z_{i1}, z_{i2}) - \min_{i=0, \dots, N}(z_{i0}, z_{i1}, z_{i2}), \quad (1)$$

где  $L_x, L_y, L_z$  – длина, высота и ширина отливки.

Вычисление объема и связанной с ним массы отливки является более сложной задачей.

В данной работе используется приближенный метод вычисления объема, который состоит в дискретизации пространства, занятого отливкой ( $L_x \times L_y \times L_z$ ), набором кубических элементов с одинаковыми размерами каждого  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$  мм. Если центр элемента расположен внутри отливки, то этот элемент пространства считается полностью заполненным материалом отливки и ему присваивается статус «полный»  $V(i, j, k) = 1$ . Иначе, элемент считается пустым и ему присваивается статус «пустой»  $V(i, j, k) = 0$ . Тогда объем отливки приблизительно равен сумме объемов элементов, заполненных материалом:

$$V_0 = \sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^J \sum_{i=0}^I (V(i, j, k) \Delta x, \Delta y, \Delta z), \quad (2)$$

где  $V_0$  – объем отливки.

При таком способе аппроксимации, чем меньше размеры элементов и более простая поверхность отливки (меньше элементов пересекается с поверхностью), тем выше точность вычисления объема.

Для определения пространственного расположения каждого элемента относительно поверхности отливки (внутри или снаружи) используется следующий алгоритм.

1. Рассматривается ряд элементов, расположенных вдоль оси  $X$ , с координатами центров  $(0,5\Delta x; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z), (1,5\Delta x; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z), \dots, ((i + 0,5)\Delta x; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z), \dots, ((I + 0,5)\Delta x; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z)$ . Их центры расположены на линии  $\{y = 0,5\Delta y; z = 0,5\Delta z\}$ .

2. Всем этим элементам присваивается статус «пустой» ( $V(i, 0, 0) = 0$ , где  $i = 0, \dots, I$ ).

3. Просматриваются все треугольники поверхности отливки и вычисляются все точки пересечения центральной линии ряда с треугольниками (рис. 1).

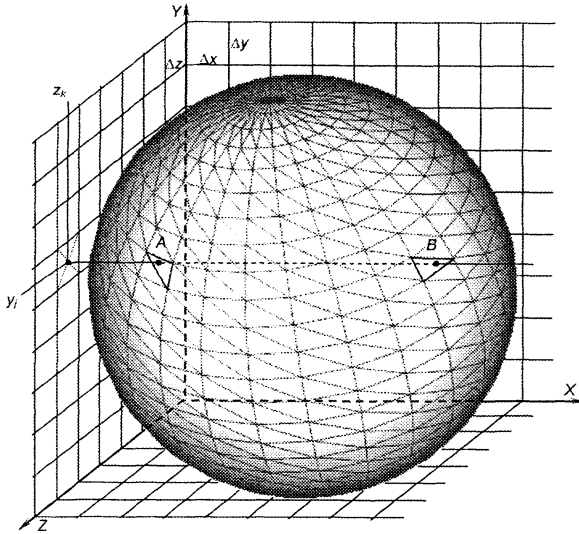


Рис. 1. Описание поверхности отливки (аппроксимируется треугольниками) пространственного распределения материала отливки (аппроксимируется объемными кубическими элементами); этап 1: поиск точек пересечения (A и B) поверхности отливки с центральной линией ( $y_i; z_k$ ) горизонтальной ряда кубических элементов

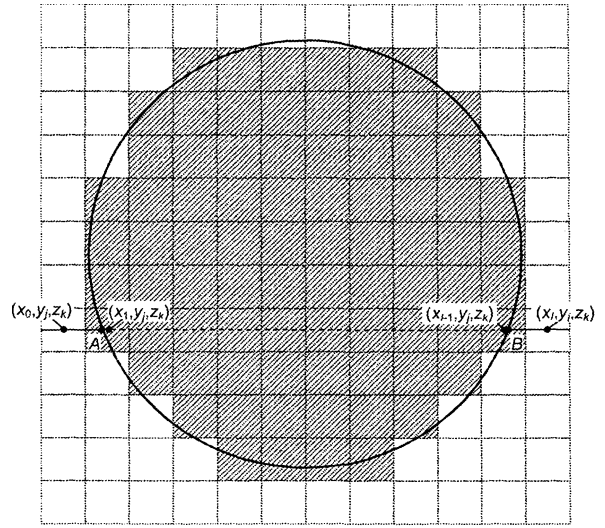


Рис. 2. Описание поверхности отливки пространственного распределения материала отливки (аппроксимируется объемными кубическими элементами); этап 2: придание кубическим элементам пространства, расположенным между точками (A и B) пересечения поверхности отливки с центральной линией горизонтального ряда, статуса «заполненных» металлом

4. Найденные точки группируются попарно в зависимости от расположения вдоль центральной линии ряда, таким образом, что отрезок линии между каждой парой точек расположен внутри отливки. Например, точки  $A(x_A; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z)$  и  $B(x_B; 0,5\Delta y; 0,5\Delta z)$  на рис. 1.

5. Всем элементам, центры которых расположены на линии между парами найденных точек пересечения, присваивается статус «полный» (рис. 2). Например,  $V(i,0,0) = 1$ , для таких  $i$ , что  $x_A < (i + 0,5)\Delta x < x_B$ .

6. Выбирается следующий ряд элементов с координатами центров  $(0,5\Delta x; (j + 0,5)\Delta y; (k + 0,5)\Delta z)$ ,  $(1,5\Delta x; (j + 0,5)\Delta y; (k + 0,5)\Delta z)$ , ...,  $((i + 0,5)\Delta x; (j + 0,5)\Delta y; (k + 0,5)\Delta z)$ , ...,  $((I + 0,5)\Delta x; (j + 0,5)\Delta y; (k + 0,5)\Delta z)$  и повторяется последовательность действий 2–5, пока все пространство не будет полностью «раскрашено» ( $j = 1, \dots, J, k = 1, \dots, K$ ).

Масса отливки определяется произведением объема на плотность металла:

$$m = V_0 \rho. \quad (3)$$

Для определения степени сходства отливок по массе и габаритным размерам задаются соотношения соответствующих параметров двух отливок, при которых они считаются абсолютно одинаковыми или абсолютно различными. Например, при соотношении масс двух отливок  $M_{eq} = m_1/m_2 = 1/1$  отливки считаются одинаковыми по массе, а при соотношении  $M_{diff} = \min\{m_1, m_2\}/\max\{m_1, m_2\} = 1/4$  — абсолютно разными по массе. В интервале между этими соотношениями отливки имеют некоторый процент сходства по массе.

Критерий степени сходства отливок по массе вычисляется по формуле:

$$K_m = \begin{cases} 1, & \text{при } \frac{\min(m_1, m_2)}{\max(m_1, m_2)} \geq M_{eq}, \\ \left( \frac{\min(m_1, m_2)}{\max(m_1, m_2)} - M_{diff} \right) / (M_{eq} - M_{diff}), & \text{при } M_{diff} < \frac{\min(m_1, m_2)}{\max(m_1, m_2)} \leq M_{eq}, \\ 0, & \text{при } \frac{\min(m_1, m_2)}{\max(m_1, m_2)} < M_{diff}. \end{cases} \quad (4)$$

Величина  $K_m$  изменяется от 0 до 1, что соответствует абсолютно различным и абсолютно одинаковым

по массе отливкам. Аналогично определяются критерии сходства по габаритным размерам:

$$K_x = \begin{cases} 1, \text{ при } \frac{\min(L_{x1}, L_{x2})}{\max(L_{x1}, L_{x2})} \geq L_{x \text{ eq}}, \\ \left( \frac{\min(L_{x1}, L_{x2})}{\max(L_{x1}, L_{x2})} - L_{x \text{ diff}} \right) / (L_{x \text{ eq}} - L_{x \text{ diff}}), \text{ при } L_{x \text{ diff}} < \frac{\min(L_{x1}, L_{x2})}{\max(L_{x1}, L_{x2})} \leq L_{x \text{ eq}}, \\ 0, \text{ при } \frac{\min(L_{x1}, L_{x2})}{\max(L_{x1}, L_{x2})} < L_{x \text{ diff}}, \end{cases} \quad (5)$$

$$K_y = \begin{cases} 1, \text{ при } \frac{\min(L_{y1}, L_{y2})}{\max(L_{y1}, L_{y2})} \geq L_{y \text{ eq}}, \\ \left( \frac{\min(L_{y1}, L_{y2})}{\max(L_{y1}, L_{y2})} - L_{y \text{ diff}} \right) / (L_{y \text{ eq}} - L_{y \text{ diff}}), \text{ при } L_{y \text{ diff}} < \frac{\min(L_{y1}, L_{y2})}{\max(L_{y1}, L_{y2})} \leq L_{y \text{ eq}}, \\ 0, \text{ при } \frac{\min(L_{y1}, L_{y2})}{\max(L_{y1}, L_{y2})} < L_{y \text{ diff}}, \end{cases} \quad (6)$$

$$K_z = \begin{cases} 1, \text{ при } \frac{\min(L_{z1}, L_{z2})}{\max(L_{z1}, L_{z2})} \geq L_{z \text{ eq}}, \\ \left( \frac{\min(L_{z1}, L_{z2})}{\max(L_{z1}, L_{z2})} - L_{z \text{ diff}} \right) / (L_{z \text{ eq}} - L_{z \text{ diff}}), \text{ при } L_{z \text{ diff}} < \frac{\min(L_{z1}, L_{z2})}{\max(L_{z1}, L_{z2})} \leq L_{z \text{ eq}}, \\ 0, \text{ при } \frac{\min(L_{z1}, L_{z2})}{\max(L_{z1}, L_{z2})} < L_{z \text{ diff}}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $L_{x1}, L_{y1}, L_{z1}$  – габаритные размеры первой отливки;  $L_{x2}, L_{y2}, L_{z2}$  – габаритные размеры второй отливки.

Для вычисления критерия сходства  $K_g$  по пространственному распределению материала отливок используется нейросетевой алгоритм, описанный ниже.

Общий (интегральный) критерий сходства определяется произведением всех частных критериев:

$$K_0 = K_m K_x K_y K_z K_g. \quad (8)$$

Этот критерий определяет степень пригодности одной и той же литниковой системы для изготовления двух различных отливок. Его значение изменяется от 0 до 1, что соответствует абсолютной непригодности и полной пригодности. На основе этого критерия строится алгоритм поиска наиболее приемлемых литниковых систем для изготовления целевой отливки из множества литниковых систем и соответствующих им отливок, хранящегося в виде компьютерной базы данных, т. е. для всех пар целевая отливка –  $n$ -я базовая отливка вычисляются критерии  $K_{on}$  и в качестве решения выбирается одна или несколько литниковых систем с наибольшим значением ( $K_o = \max_{n=1, \dots, N}(K_{on})$ ).

*Нейросетевой алгоритм оценки степени схожести двух отливок по пространственному распределению материала.*

Для вычисления критерия сходства  $K_g$  по пространственному распределению материала отливок используется нейросетевой алгоритм. Сущность

алгоритма состоит в использовании специально разработанной распределенной решающей системы, называемой нейронной сетью (НС) по аналогии с уже существующими и широко используемыми подобными системами. Эта НС вырабатывает числовую характеристику  $K_g$  и настраивается на выработку приемлемых решений в процессе специальной процедуры, называемой «обучением» или «тренировкой». Для тренировки НС используется множество входных пар обучающих отливок и соответствующие им значения  $K_g$ , определенные экспертом.

Структура разработанной сети показана на рис. 3.

Поскольку анализируется трехмерное геометрическое пространство, матрица входных элементов (рецепторов  $R$ ) представляет собой трехмерный массив  $10 \times 10 \times 10$ . Это значит, что геометрическое пространство сравниваемых отливок делится на  $10 \times 10 \times 10$  соответствующих прямоугольных областей, в которых анализируется количество материала. Поскольку конечная цель работы разрабатываемой программы – выбрать несколько наиболее подходящих для целевой отливки из множества  $N$  базовых отливок, то сеть имеет  $N$  решающих элементов (нейронов  $O_1, \dots, O_N$ ), каждый из которых вырабатывает критерий сходства  $K_g$  для соответствующей пары входной и базовой отливок ( $K_{g1}, \dots, K_{gN}$ ). Величина  $K_g$  изменяется от 0 до 1,

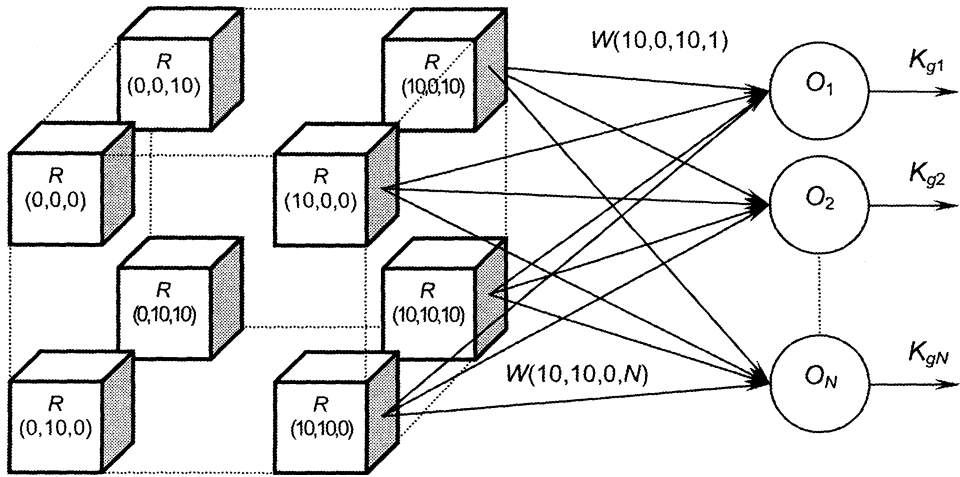


Рис. 3. Структура нейронной сети для вычисления критериев сходства  $K_{g1}, \dots, K_{gN}$  по пространственному распределению материала произвольной входной отливки и  $N$  базовых отливок:  $R(0,0,0), \dots, R(10,10,10)$  – трехмерное поле рецепторов сети;  $O_1, \dots, O_N$  – решающие элементы (нейроны);  $W(0,0,0,1), \dots, W(10,10,10, N)$  – весовые коэффициенты связей нейронов

которые соответствуют полной противоположности и полной идентичности пространственного распределения материала в отливках, т. е. наиболее подходящий вариант будет соответствовать максимальному значению ( $K_g = \max_{n=1, \dots, N} (K_{gn})$ ).

Весовые коэффициенты связи между рецепторами и нейронами  $W(0,0,0,1), \dots, W(10,10,10, N)$  определяют вклад (или значимость) каждого элемента пространства в решение о сходстве входной отливки и соответствующей нейрону базовой отливки. Величина  $W(i, j, k, n)$  изменяется от 0 до 1, которые соответствуют полному безразличию принимаемого решения к наличию материала в области пространства  $(i, j, k)$  и максимальной значимости.

Первая задача, которая решается в контексте этого алгоритма, состоит в преобразовании трехмерного пространственного распределения материала двух сравниваемых отливок во множество сигналов, которые поступают на вход матрицы рецепторов нейронной сети. Исходное дискретное распределе-

ние материала было получено в процессе расчета объема отливки. Оно представляет собой трехмерное поле кубических элементов одинакового ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,5$  мм) размера, каждый из которых имеет одно из двух состояний: «0» – пустое пространство и «1» – заполненное металлом пространство (рис. 4, а). Количество элементов по разным пространственным направлениям в общем случае – различное и зависит от габаритных размеров отливки. Требуется получить трехмерное поле  $10 \times 10 \times 10$  прямоугольных элементов одинакового размера. Но длина, ширина и высота элемента в общем случае отличаются между собой и зависят от габаритных размеров отливки:  $\Delta x_R = L_x/10, \Delta y_R = L_y/10, \Delta z_R = L_z/10$ . Состояние каждого элемента определяется непрерывной величиной в соответствии с количеством металла, находящегося в области пространства, занятого элементом (рис. 4, б).

Исходя из приведенного представления, значение входного сигнала, поступающего на вход каждого рецептора, определяется выражением:

$$R_{in}(l, m, p) = \frac{\sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^J \sum_{i=0}^I \left\{ \begin{array}{l} V(i, j, k) \Delta x \Delta y \Delta z, \text{ при } l \Delta x_R \leq (i+0,5) \Delta x < (l+1) \Delta x_R \text{ и} \\ m \Delta y_R \leq (j+0,5) \Delta y < (m+1) \Delta y_R \text{ и} \\ p \Delta z_R \leq (k+0,5) \Delta z < (p+1) \Delta z_R; \\ 0, \text{ при } l \Delta x_R \leq (i+0,5) \Delta x < (l+1) \Delta x_R \text{ и} \\ m \Delta y_R \leq (j+0,5) \Delta y < (m+1) \Delta y_R \text{ и} \\ p \Delta z_R \leq (k+0,5) \Delta z < (p+1) \Delta z_R \end{array} \right.}{\sum_{k=0}^K \sum_{j=0}^J \sum_{i=0}^I \left\{ \begin{array}{l} \Delta x \Delta y \Delta z, \text{ при } l \Delta x_R \leq (i+0,5) \Delta x < (l+1) \Delta x_R \text{ и} \\ m \Delta y_R \leq (j+0,5) \Delta y < (m+1) \Delta y_R \text{ и} \\ p \Delta z_R \leq (k+0,5) \Delta z < (p+1) \Delta z_R; \\ 0, \text{ при } l \Delta x_R \leq (i+0,5) \Delta x < (l+1) \Delta x_R \text{ и} \\ m \Delta y_R \leq (j+0,5) \Delta y < (m+1) \Delta y_R \text{ и} \\ p \Delta z_R \leq (k+0,5) \Delta z < (p+1) \Delta z_R \end{array} \right.}, \quad (9)$$

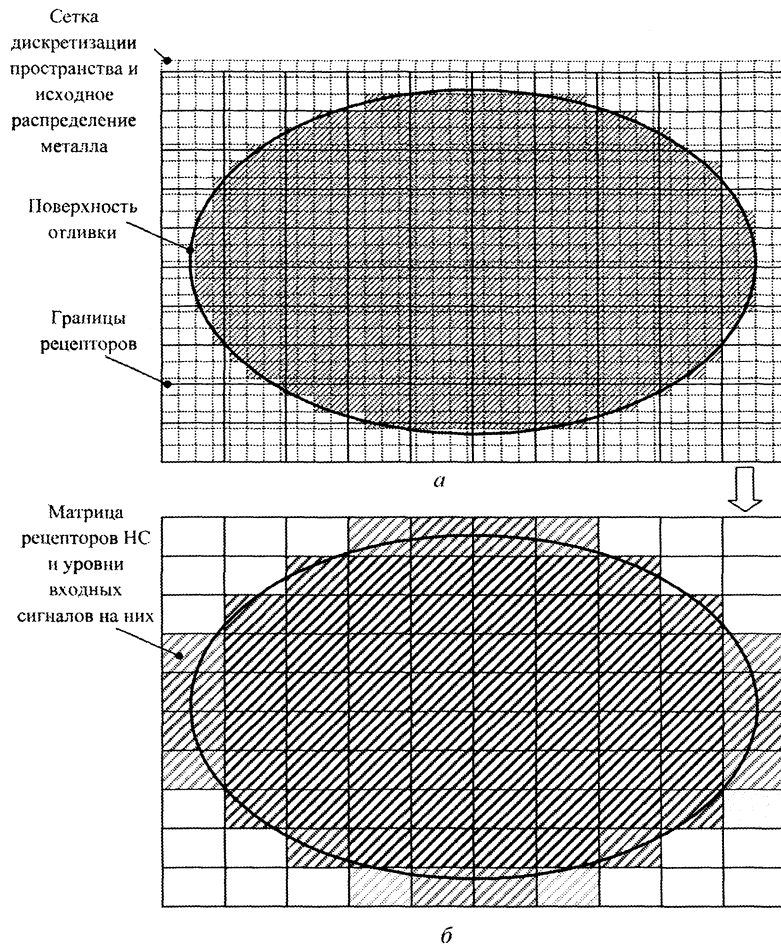


Рис. 4. Преобразование дискретного пространственного распределения материала отливки во множество входных сигналов матрицы рецепторов нейронной сети: темная штриховка – высокие значения входных сигналов, светлая штриховка – низкие значения входных сигналов; *a* – дискретное пространственное распределение материала отливки; *b* – множество входных сигналов матрицы рецепторов нейронной сети

где  $l, m, p$  – индексы рецептора в трехмерном массиве рецепторов по координатным направлениям  $X, Y, Z$  соответственно;  $\Delta xR, \Delta yR, \Delta zR$  – размеры пространства рецептора;  $i, j, k$  – индексы элементов дискретизации пространства по координатным направлениям  $X, Y, Z$  соответственно;  $I, J, K$  – максимальные значения индексов  $i, j, k$ ;  $\Delta x = \Delta y = \Delta z$  – шаг дискретизации пространства (размеры элементов дискретизации пространства);  $V(i, j, k)$  – функция распределения материала отливки по пространству.

Это значение изменяется в пределах  $0, \dots, 1$  и приблизительно равно соотношению объема, занятого металлом, в пространстве рецептора к общему объему пространства рецептора. Каждый рецептор  $R(l, m, p)$  принимает два входных сигнала  $R_{inA}(l, m, p)$  и  $R_{inB}(l, m, p)$ , соответствующих распределению материала в целевой и базовой отливках, и вырабатывает выходной сигнал

$$R_{in}(l, m, p) = 1 - |R_{inA}(l, m, p) - R_{inB}(l, m, p)|, \quad (10)$$

т. е. функция рецептора  $R(l, m, p)$  – определить, насколько количество металла в целевой отливке отличается от количества металла в базовой отливке для  $(l, m, p)$ -й области пространства.

Каждый  $n$ -й нейрон сети принимает сигналы (10) со всех рецепторов и вырабатывает на выходе результирующий сигнал  $K_{gn}$ , величина которого вычисляется по формуле:

$$K_{gn} = \frac{\sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{p=0}^P (W(l, m, p, n) R(l, m, p))}{\sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{p=0}^P W(l, m, p, n)}. \quad (11)$$

#### Алгоритм обучения нейронной сети

Сущность «тренировки» сети состоит в подборе таких весовых коэффициентов связи  $W(0,0,0, n), \dots, W(10,10,10, n)$  между рецепторами и  $n$ -м нейроном, чтобы величина критерия  $K_{gn}$  была корректной с субъективной точки зрения эксперта.

В данной работе использован следующий алгоритм «тренировки»:

1) на вход нейронной сети предъявляется некоторая целевая отливка;

2) выбирается отливка  $n$  из имеющегося в базе данных множества прототипов;

3) НС вырабатывает некоторое значение критерия  $K_{gn}$  для этой пары отливок;

4) если значение критерия эксперт признает неправильным и вводит правильное значение  $K'_{gn}$ , то весовые коэффициенты связей изменяются в соответствии с формулой:

$$W'(l, m, p, n) = W(l, m, p, n) + \Delta WR(l, m, p), \quad (12)$$

где  $W'(l, m, p, n)$  – новое значение коэффициента;  $l = 1, \dots, L, m = 1, \dots, M, p = 1, \dots, P$ ; величина  $\Delta W$  вычисляется по формуле:

$$\Delta W = \frac{(K_{gn} - K'_{gn}) \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{p=0}^P W(l, m, p, n)}{K'_{gn} \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{p=0}^P R(l, m, p) - \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{p=0}^P R^2(l, m, p)};$$

5) если значение критерия эксперт признает правильным, то выбирается следующая отливка из базы (переход на шаг 2);

6) если для всех прототипов  $n = 1, \dots, N$  НС вырабатывает правильные критерии, то тренировка закончена (для данной целевой отливки).

Для более качественной работы системы этот алгоритм должен быть повторен для возможно большего числа различных входных отливок.

Таким образом, разработаны нейросетевые алгоритмы, позволяющие оценить степень подобия двух отливок по пространственному распределению материала. Это может стать основой создания новой группы алгоритмов для выбора литниковых систем отливок с неопределенной литниковой системой и их дальнейшей оптимизации с помощью систем компьютерного моделирования литейных процессов.

### Литература

1. Чичко А. Н., Матюшинец Т. В., Марков Л. В. и др. Модели и алгоритмы для САПР технологического процесса изготовления отливок, ориентированного под суперкомпьютер СКИФ // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 94–101.
2. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф. и др. Автоматизация разработки технологических процессов литейного производства на основе КС «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер «СКИФ» // *Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Мн., 28–29 окт. 2009 г. Мн., 2009. С. 252–254.*
3. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф. и др. Свидетельство о регистрации компьютерной программы «ПроЛит». 2008.
4. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Матюшинец Т. В. и др. Оптимизация технологии изготовления отливок с использованием суперкомпьютера СКИФ // *Литье и металлургия*. 2008. № 4. С. 97–103.
5. Горбань А. Н. Решение задач нейронными сетями // *Нейроинформатика*. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998.
6. Ежов А. А., Шумский С. А. *Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе*. М.: МИФИ, 1998.
7. Уоссермен Ф. *Нейрокомпьютерная техника: теория и практика* / Пер. с англ. М.: Мир, 1992.
8. Осовский С. *Нейронные сети для обработки информации* / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002.
9. Горбань А. Н., Россиев Д. А. *Нейронные сети на персональном компьютере*. М.: Наука, 1996.