

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ПРИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ КРУГЛЫХ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ

*Н.П. Кузнецова, к.т.н., с.н.с., доцент кафедры ТЭМП*

*Н.А. Краюшкин, аспирант кафедры ТЭМП*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Россия)

**Аннотация.** В работе детально изучается проблема получения высококачественных полунепрерывнолитых круглых заготовок из специальных марок сталей. Приводятся данные исследований процессов затвердевания круглых заготовок в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения с учетом развитой двухфазной зоны на первом этапе процесса полунепрерывной разливки стали. На основе этих данных ведется поиск и делаются выводы о режимах охлаждения в зоне вторичного охлаждения для получения заготовок круглого сечения максимально высокого качества с целью возможной дальнейшей реализации такого режима на практике.

**Ключевые слова:** полунепрерывная разливка, кристаллизатор, скорость разливки, качество заготовок, зона вторичного охлаждения, жидкометаллическая лунка.

*E-MAIL:* kna-1989@mail.ru

Широкое применение технологии непрерывного литья является перспективным направлением получения металлов и сплавов высокого качества. Однако степень освоения непрерывной разливки различных профилей и типоразмеров заготовок находится на сравнительно низком уровне. Большие трудности возникают при непрерывной разливке круглых заготовок, поэтому их доля в общем объеме производимых в настоящее время непрерывнолитых заготовок невелика. Основная причина низких темпов освоения производства непрерывнолитых круглых заготовок заключается в особенностях процессов их отливки и формирования. Повышенная склонность круглого слитка к развитию овальности профиля поперечного сечения и возникновению продольных трещин на начальной стадии затвердевания приводит к тому, что круглые заготовки чаще разливаются на установках полунепрерывной разливки и обеспечение высокого качества заготовок является сложной задачей.

Формирование структуры и свойств металла прежде всего определяется процессами теплопереноса в затвердевающих слитках. Сложная взаимосвязь явлений и многообразие влияющих факторов на напряженное состояние слитка ставят исследование процессов теплопереноса при полунепрерывной разливке в ряд важнейших и актуальных задач. Решение этих задач на современном уровне немислимо без применения комплексного математического моделирования процессов затвердевания с учетом теплотехнических и технологических требований, определяющих допустимую скорость вытягивания и обеспечивающих получение бездефектных слитков [1, 2].

В ходе исследований была разработана математическая модель процессов затвердевания при полунепрерывной разливке расплавов сложного состава в круглые заготовки большого диаметра, требуемые для трубного производства [3].

В данной работе процесс формирования слитка исследуется в приближении модели затвердевания слитка, при этом физико-химический процесс кристаллизации из рассмотрения исключается.

Согласно принятой гипотезе тепловые условия в слитке являются фактором, определяющим показатели его качества, что позволяет на основе информации о температурных полях слитка в различные периоды процесса затвердевания прогнозировать данные показатели и целенаправленно управлять ими.

Разработанная математическая модель использовалась для исследования режимов затвердевания круглых стальных заготовок диаметром 250 мм и длиной 7,83 м на установке полунепрерывной разливки стали (УПНРС) ОАО «Металлургический завод "ЭЛЕКТРОСТАЛЬ"» с целью выбора и обоснования рациональных технологических параметров разливки. Поиск рациональных тепловых режимов УПНРС проводился на основе комплексного подхода, т.е. рассмотрения в едином комплексе процессов охлаждения в кристаллизаторе, в зоне вторичного охлаждения и на воздухе с учетом теплотехнических и технологических требований, ограничивающих допустимую скорость вытягивания слитка.

Важную роль в получении высокого качества слитков играют тепловые процессы, протекающие в кристаллизаторе. Кристаллизатор должен обеспечить интенсив-

ный теплоотвод по всей его длине и сформировать на выходе из него твердую оболочку слитка достаточной толщины и прочности. При этом необходимо создать условия, при которых отсутствуют опасные напряжения, которые могли бы привести к появлению трещин. При неправильном скоростном режиме разливки, плохом состоянии рабочей поверхности кристаллизатора и в результате образования газового зазора между стенками кристаллизатора и поверхностью слитка возникает опасность прорыва жидкого металла.

Расчеты показывают, что при ведении процесса полунепрерывной разливки со скоростью 0,7 м/мин при заполнении зазора между корочкой и стенкой кристаллизатора шлакообразующей смесью толщина корочки слитка на выходе из кристаллизатора составит 22,5 мм, а температура поверхности корочки – 1120 °С. Время пребывания расплава в кристаллизаторе до образования слоя затвердевшей стали толщиной 22,5 мм составляет 69 с или 1,15 мин [4].

На рис. 1 изображено изменение температуры поверхности затвердевающей корочки в кристаллизаторе. Видно, что температура держится в пределах нормы.

На рис. 2 показано, как нарастает корочка по длине кристаллизатора. В начале процесса толщина корочки равна нулю, поскольку температура жидкой стали не

равна температуре кристаллизации и нужно время для ее достижения.

Анализируя данные графики, можно сделать вывод о параметрах разливки для слитков сечением 250 мм:

- скорость разливки  $v = 0,7$  м/мин;
- толщина корочки слитка на выходе из кристаллизатора  $d = 22,5$  мм;
- температура поверхности корочки на выходе из кристаллизатора  $T = 1120$  °С;
- в зазор между расплавом и стенкой кристаллизатора подается шлакообразующая смесь с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 1,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- время пребывания расплава в кристаллизаторе до образования корочки толщиной 22,5 мм  $\tau = 1,15$  мин.

Тепловые режимы вторичного охлаждения оказывают существенное влияние на производительность УПНРС и качество отливаемых полунепрерывнолитых заготовок.

Для обеспечения высокого качества получаемых полунепрерывнолитых слитков необходимо анализировать условия охлаждения, принципы и методы его организации, установить основные закономерности теплопередачи в зону вторичного охлаждения (ЗВО) и возможности управления тепловыми режимами охлаждения полунепрерывнолитых заготовок.

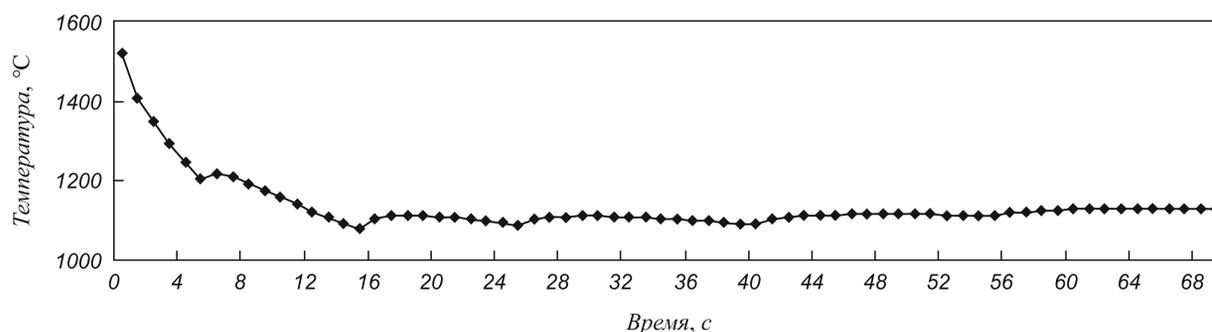


Рис. 1. Изменение температуры поверхности затвердевающей корочки

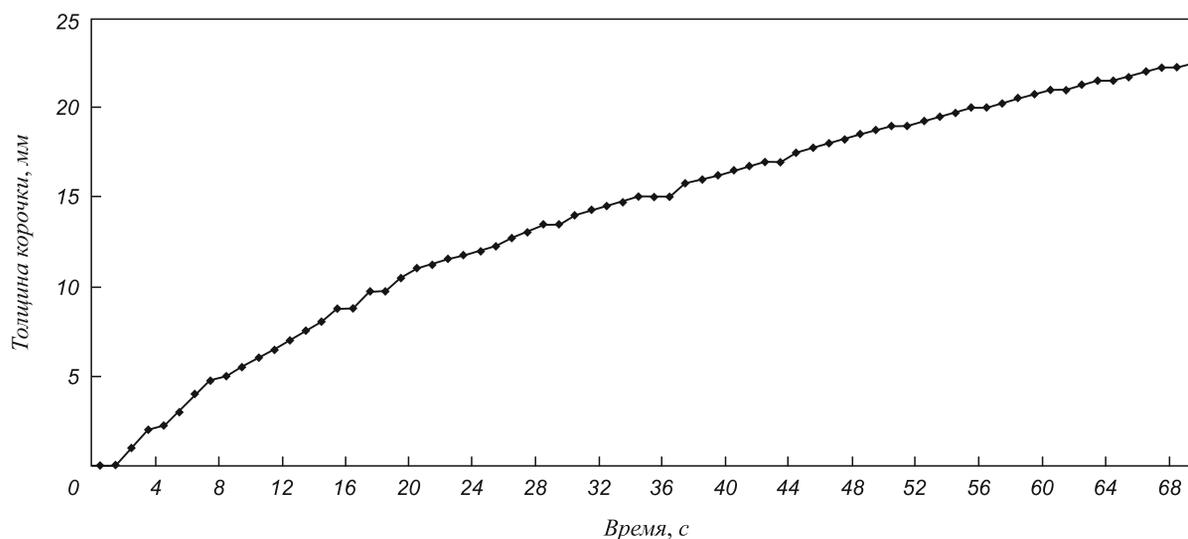


Рис. 2. Изменение толщины корочки в кристаллизаторе

В пределах ЗВО следует обеспечить необходимую интенсивность охлаждения слитка, при которой достигается равномерное и непрерывное снижение температуры поверхности, что способствует повышению качества отливки. При неправильной организации теплового режима охлаждения может происходить резкое изменение температуры поверхности слитка по его высоте и периметру, приводящее к росту термических напряжений и возможности появления трещин.

В конце ЗВО принудительное водовоздушное охлаждение прекращается и начинается зона неконтролируемого естественного охлаждения слитка на воздухе. Здесь полунепрерывнолитой слиток продолжает охлаждаться за счет излучения и естественной конвекции до полного затвердевания по сечению.

Основное количество тепла отводится от слитка за счет излучения в окружающее пространство и лишь незначительная часть тепла передается за счет естественной конвекции, а также теплопроводностью в ролики по механизму контактного теплообмена [5, 6].

Методом математического моделирования проведено исследование процесса затвердевания слитка в зоне вторичного охлаждения и на воздухе при скорости разливки  $v = 0,7$  м/мин с целью исследования режимов затвердевания заготовки.

Разливка слитка происходит в два этапа:

- формирование заданной длины и формы слитка;
- обеспечение полного затвердевания разливаемого металла.

Зона вторичного охлаждения имеет длину 3,59 м и разделена на три секции. Для всех секций предусмотре-

**Параметры охлаждения слитка в ЗВО при скорости разливки  $v = 0,7$  м/мин**

Номер секции	Длина секции, м	Температура поверхности слитка на выходе, °С	Толщина корочки на выходе, мм	Коэффициент теплоотдачи в секции, Вт/м <sup>2</sup> ·К
1	0,38	958	29	500
2	1,17	876	46,5	350
3	2,04	850	71,5	200

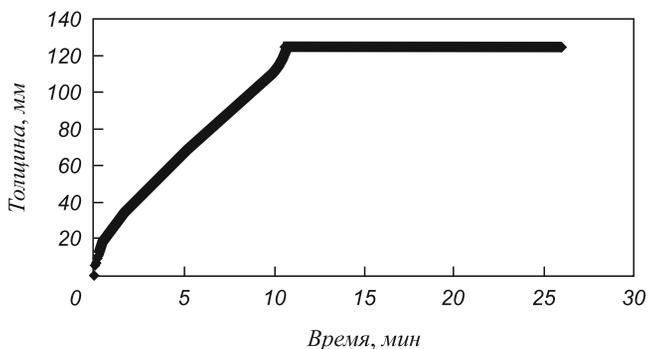


Рис. 3. Изменение толщины корочки во времени

рено водо-воздушное охлаждение с помощью форсунок.

Расчетами определены параметры охлаждения слитка в ЗВО при скорости разливки  $v = 0,7$  м/мин (см. таблицу).

Результаты анализа процесса затвердевания в ЗВО и на воздухе представлены на рис. 3 – 5, анализируя которые можно сделать вывод о режимах затвердевания в ЗВО при скорости вытягивания  $v = 0,7$  м/мин.

Рис. 3 показывает нарастание корочки во времени. Из него мы видим, что корочка равномерно нарастает по всей длине и на 12-ой минуте происходит закрытие конуса из-за полной кристаллизации по сечению.

Из рис. 4 видно, что двухфазная зона развивается с самого начала процесса затвердевания и растет со временем. Для увеличения качества получаемых заготовок ее ширину необходимо уменьшать.

Анализируя рис. 5 можно сделать вывод о том, что температура по поверхности заготовки изменяется неравномерно. После выхода из зоны вторичного охлаждения на воздух на участке длиной от 3,59 до 5,15 м происходит постепенный разогрев поверхности заготовки с 854 до 930 °С, т. е. на 76 °С, что может отрицательно сказаться на качестве получаемых заготовок и привести к образованию поверхностных трещин и дефектов.

В ходе исследований было получено итоговое время вытягивания слитка, равное 12,3 мин. Из ЗВО заготовка выходит на 5,13 минуте и остальное время охлаждается на воздухе.

Толщина корочки равномерно растет и на выходе из ЗВО достигает величины 71,5 мм. Толщина жидкого слоя в этот же момент времени равна 53,5 мм.

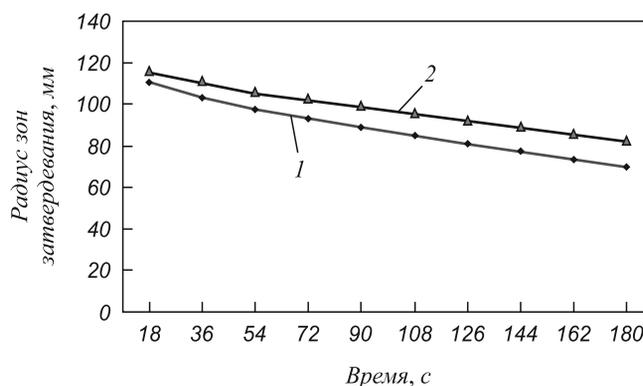


Рис. 4. Изменение радиусов жидкой (1) и твердой (2) фаз

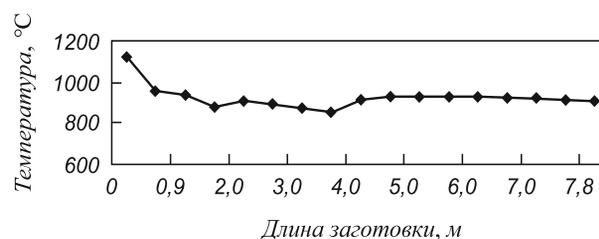


Рис. 5. Изменение температуры поверхности заготовки по ее длине в зоне вторичного охлаждения и на воздухе

После выхода из ЗВО требуется еще 6,44 мин, чтобы слиток по сечению полностью затвердел. Время полного затвердевания слитка – 11,57 мин.

После полного затвердевания жидкого металла на 11,57 минуте требуется еще 0,73 мин, чтобы вытянуть слиток до необходимой длины (7,83 м) и поставить его. На этом заканчивается первый этап и начинается второй, т. е. обеспечение полного затвердевания разливаемого металла.

Расположение конуса жидкого металла показано на рис. 6.

Основными недостатками реализации данного режима являются разогрев поверхности затвердевающего металла на участке воздушного охлаждения после выхода из ЗВО и большая протяженность (более 7 м) жидкометаллической лунки в заготовке. Это имеет особенно важное значение, так как большая часть лунки протяженностью 3,7 м находится в зоне нерегулируемого воздушного охлаждения, что означает невозможность контроля процесса затвердевания лунки на втором этапе. В силу особенностей структуры сталей такой режим можно рекомендовать для разливки только сталей нержавеющей марок.

**Выводы.** В ходе исследований разработана математическая модель затвердевания круглых заготовок при непрерывной и полунепрерывной разливке сплавов сложного состава. При проектировании и поиске рациональных режимов УПНРС скорость разливки должна обоснованно выбираться как основной технологический параметр и разработанная математическая модель может быть рекомендована для решения этой задачи. Найдена зона высокого перепада температуры по поверхности на первом этапе после выхода на естественное воздушное охлаждение (около 80 °С), что отрицательно скажется на качестве получаемых заготовок. Также возникают трудности при выборе режимов вторичного охлаждения в установках полунепрерывной разливки стали, когда перед второй стадией процесса разливки необходимо сформировать слиток с ми-

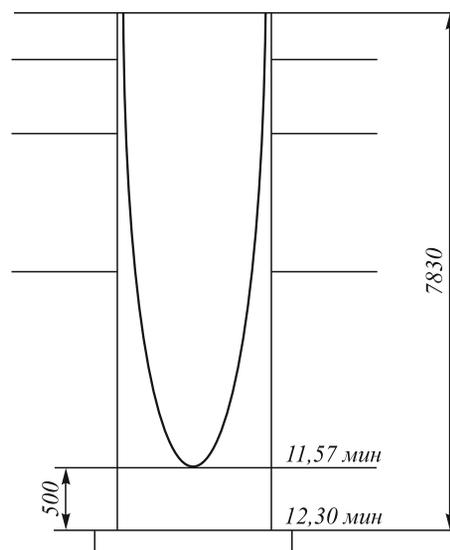


Рис. 6. Расположение конуса жидкого металла в конце первого этапа

нимальной длиной жидкометаллической лунки, в чем в дальнейшем поможет разработанная математическая модель.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1988. – 142 с.
2. Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М. И. Староселецкий и др. – М.: Металлургия, 1984. – 143 с.
3. Кузнецова Н. П., Никитин Д. А. // 66-ые дни науки МИСиС. С. 287 – 294.
4. Краюшкин Н.А., Кузнецова Н. П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 7. С. 45 – 48.
5. Стальной слиток. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Ю.А. Самойлович и др. – Минск: Белорусская наука, 2000. – 640 с.
6. Самойлович Ю. А. О выборе критериев оптимального затвердевания слитка // Оптимизация теплофизических процессов литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1997. С. 59 – 65.

© 2014 г. Н.П. Кузнецова, Н.А. Краюшкин  
Поступила 17 декабря 2013 г.

## RESEARCH OF THERMAL MODES OF SOLIDIFICATION IN SEMI-CONTINUOUS CASTING ROUND STEEL INGOTS FOR THE PRODUCTION OF SEAMLESS TUBES

*N.P. Kuznetsova, Cand.Eng., Senior Scientist, Associate Professor*

*N.A. Krayushkin, Student*

National University of Science and Technology “MISIS” (Moscow, Russia)

E-MAIL: kna-1989@mail.ru

**Abstract.** Authors studied the problem of obtaining high-quality semi-continuous round ingots of special steels in detail. There are the research data of solidification of round ingots in the graining pan and in the zone of with the development of two-phase zone in the first stage of the process of semi-continuous casting. On the basis of these data research, the search is conducted and conclusions about the modes

of refrigeration in the zone of secondary refrigeration are described for obtaining the highest quality ingots with a view to possible further implementation of such mode in practice.

**Keywords:** semi-continuous casting, graining pan, speed of casting, quality of product, zone of secondary refrigeration, hole of liquid metal.

#### REFERENCES

1. Emel'janov V.A. *Teplovaja rabota mashin nepreryvnogo lit'ja zagotovok: Uchebnoe posobie.* (Thermal performance of continuous casting machines: Textbook). Moscow: Metallurgija. 1988. 142 p.
2. Genkin V.Ja., Esaulov A.T., Staroseleckij M.I., Pikus M.I., Zhuravl'ov V.A. *Neprevynolitye kruglye zagotovki* (Continuous casting of round billets). Moscow: Metallurgija, 1984, 143 p.

3. Kuznecova N.P., Nikitin D.A. *66-ye dni nauki MISiS*. pp. 287 – 294.
4. Krajushkin N.A., Kuznecova N.P. *Izv. Vuz. Chernaja metallurgija*. 2013. № 7. pp. 45 – 48.
5. Samojlovich Ju.A. etc. *Stal'noj slitok. T. 2: Zatverdevanie i ohlazhdenie* (Steel ingot. Vol. 2: The solidification and cooling). Minsk: Belorusskaja nauka, 2000. 640 p.
6. Samojlovich Ju.A. *O vybore kriteriev optimal'nogo zatverdevanija slitka. Optimizacija teplofizicheskikh processov lit'ja* (On the selection criteria for optimal ingot solidification. Optimization of thermal molding processes) Kiev: IPL An USSR. 1997. pp. 59 – 65.

Received 17 December 2013

УДК 669.041 : 536.331.001.573

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР ЧИСЛА УЗЛОВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Р.П. Коптелов, аспирант*  
*А.М. Конашкова, к.т.н., доцент*

Уральский федеральный университет (Екатеринбург, Россия)

**Аннотация.** Угловые коэффициенты для двух примеров промышленных геометрий – методической печи нагрева цилиндрических заготовок и секционной печи шаропрокатного цеха рассчитаны с помощью ранее разработанного априорного метода выбора числа узлов интегрирования. Показано, что по сравнению со стандартным методом без автоматического выбора, новый метод обеспечивает на порядок меньшее время при высокой точности расчета.

**Ключевые слова:** теплообмен излучением, угловые коэффициенты, интегрирование.

*E-MAIL:* r-koptelov@mail.ru

Детализированные расчеты высокотемпературных энергетических агрегатов и печей требуют все более точных моделей теплообмена излучением [1, 2]. Для моделирования теплообмена излучением необходимо вычисление большого числа угловых коэффициентов излучения, в том числе между ограничивающими поверхностями сетки. В ряде случаев (электрические печи сопротивления, индукционный нагрев, печи с радиационными трубами и с защитной атмосферой, охлаждение на адьюстаже и др.) наличием среды между поверхностями можно пренебречь.

В отсутствие поглощающей и рассеивающей среды на пути излучения тепловой поток на поверхность  $i$  с использованием зонального метода может быть записан следующим выражением [1]:

$$Q_i = A_i \sum_{j=1}^M F_{ij} \int_0^{\infty} (J_{\lambda,i} - J_{\lambda,j}) d\lambda, \quad (1)$$

где  $F_{ij}$  – угловой коэффициент между диффузными поверхностями  $i$  и  $j$ ,  $A$  – площадь поверхности,  $M$  – количество поверхностей, участвующих в теплообмене,  $J$  – тепловой поток эффективного излучения,  $J_{\lambda,i}$  – спектральный тепловой поток эффективного излучения,  $\lambda$  – длина волны излучения. Угловой коэффициент излучения  $F_{ij}$  равен доле лучистой энергии, испущенной и отраженной поверхностью  $i$  и дошедшей напря-

мую до поверхности  $j$  [3]. В металлургических печах с большим количеством зон может потребоваться вычисление десятков, и даже сотен тысяч угловых коэффициентов  $F_{ij}$  [4]. Это представляет наибольшую сложность при вычислении тепловых потоков и температур в большом количестве поверхностных зон печи.

### Метод автоматического выбора числа узлов интегрирования

Ранее авторами было проведено численное сравнение различных методов вычислений угловых коэффициентов излучения между четырехугольными поверхностями для их различных геометрических расположений [5]. В работе использовались методы двойного и одинарного поверхностного интегрирования и двойного и одинарного контурного интегрирования. Результаты показали, что точность вычислений углового коэффициента во всех этих методах может быть априори оценена с помощью одного простого параметра – эффективного расстояния (ЭР) (рис. 1).

Можно найти значения ЭР: ЭР(10%), ЭР(5%), ЭР(2%) и ЭР(1%) такие, что если  $ЭР_{ij}$ , вычисленный для пары четырехугольников  $i, j$  больше, чем, например, ЭР(5%), то погрешность априори должна быть меньше, чем 5%, так как это выполняется для всевозможных взаимных расположений четырехугольников.