

УДК 621.74:004.942

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р. техн. наук,
И.В. ПРОКОПОВИЧ, канд. техн. наук,
М.А. ДУХАНИНА, А.В. ШМАРАЕВ, Одесса, Украина

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Показано, що більшість об'єктів ливарного виробництва має структурну чутливість: залежність якості кінцевого продукту – вилівки від структури цих об'єктів. Запропоновані методи кількісної оцінки взаємозв'язків «технологія – структура – властивості» і параметрів, за якими ця оцінка проводиться.

Показано, что большинство объектов литейного производства обладает структурной чувствительностью: зависимостью качества конечного продукта –отливки от структуры этих объектов. Предложены методы количественной оценки взаимосвязей «технология – структура – свойства» и параметров, по которым эта оценка производится.

It is shown that most of the objects foundry has a structural sensitivity: dependence on the quality of the final product –the casting of the structure of these objects. The methods for quantifying relationships "technology –structure –property" and the parameters on which this assessment is made.

Введение. Количество материалов, единиц оборудования и технологий литейного производства превышает десятки тысяч. Как и всякая сложная система, каждая из них может быть представлена в виде отдельных подсистем, а значит, обладает структурой: набором элементов и связей между ними. Поэтому свойства каждого объекта в значительной степени зависят от этой структуры и, следовательно, качество результата литейного производства –отливки также зависит от этой структуры. Более того, сама отливка также обладает структурой, и, следовательно, проблема структурочувствительности сопровождает жизненный цикл литейного производства, начиная от исходных материалов и кончая готовыми изделиями.

Постановка проблемы. Структурочувствительность объектов литейного производства – понятие качественное. Поэтому, для того чтобы иметь возможность оценивать эту чувствительность или сравнивать два однородных объекта по ее величине необходимо решить задачу выбора параметров структурной чувствительности, а также единиц и методов их измерения. Большое значение при решении этой задачи имеет

стохастичность многих характеристик литейного производства. Разрабатываемые параметры должны учитывать эту стохастичность. Важнейшим аспектом проблемы, без которого решение задачи оценивания структурной чувствительности объектов литейного производства не имеет смысла, является связь между технологией литейного производства на этапах ее проектирования и управления, с этой структурой. Ведь, в конечном итоге, только по цепочке «технология → структура → качество» можно эффективно управлять последним.

Обзор существующих достижений. Поскольку объекты литейного производства (ОЛП) крайне разнородны, параметры их структурной чувствительности существуют разные. Попытку связать технологические характеристики со свойствами литейных форм и отливок осуществляли многие исследователи. В частности, предпринимались попытки связать технологию чугунного литья с герметичностью отливки [1, 2], технологию изготовления песчаной литейной формы с условиями протекания в ней [3 – 5], технологическую структурную чувствительность вспомогательных материалов с их свойствами [6] и многие другие. Существуют и другие работы в области взаимосвязи между технологией и структурой [7 – 8].

К сожалению, эти работы посвящены некоторым конкретным материалам и технологиям и не дают исследователю общей картины влияния структуры, не учитывают организационную структуру литейного производства, взаимовлияние перечисленных структур и многое другое.

Поэтому **целью настоящей работы** является повышение эффективности литейного производства путем создания метода управления качеством отливок, основанного на общей модели технико-организационного управления литейной технологией и единого метода оценки их чувствительности к изменениям структуры.

Основной материал работы. Разделим литейное производство на *материальные* (формовочные и вспомогательные материалы, литейные формы, отливки и т.п.), *технические* (технология, оборудование, инструмент) и *организационные* (менеджмент, персонал, стандарты, нормативы, документация, инструкции и пр.) ОЛП.

Схема взаимодействия материальных ОЛП на этапах проектирования и управления с качеством отливок представлена на рис. 1.

На рисунке, кроме перечисленных ОЛП, представлено также его турбулентное окружение. Турбулентность определяется, прежде всего, отклонениями реальных характеристик используемых материалов, энергоносителей и прочих компонентов процесса от проектных. Кроме того окружение влияет на процессов ОЛП через стохастические природные условия, брак, аварийные ситуации, а также через некомпетентные и недобросовестные действия персонала литейных

цехов [9]. В результате, например, в литейной форме могут появиться местные пере- или недоуплотнения, несплошности, другие дефекты анизотропности и пр., а в отливках – все известные виды брака.

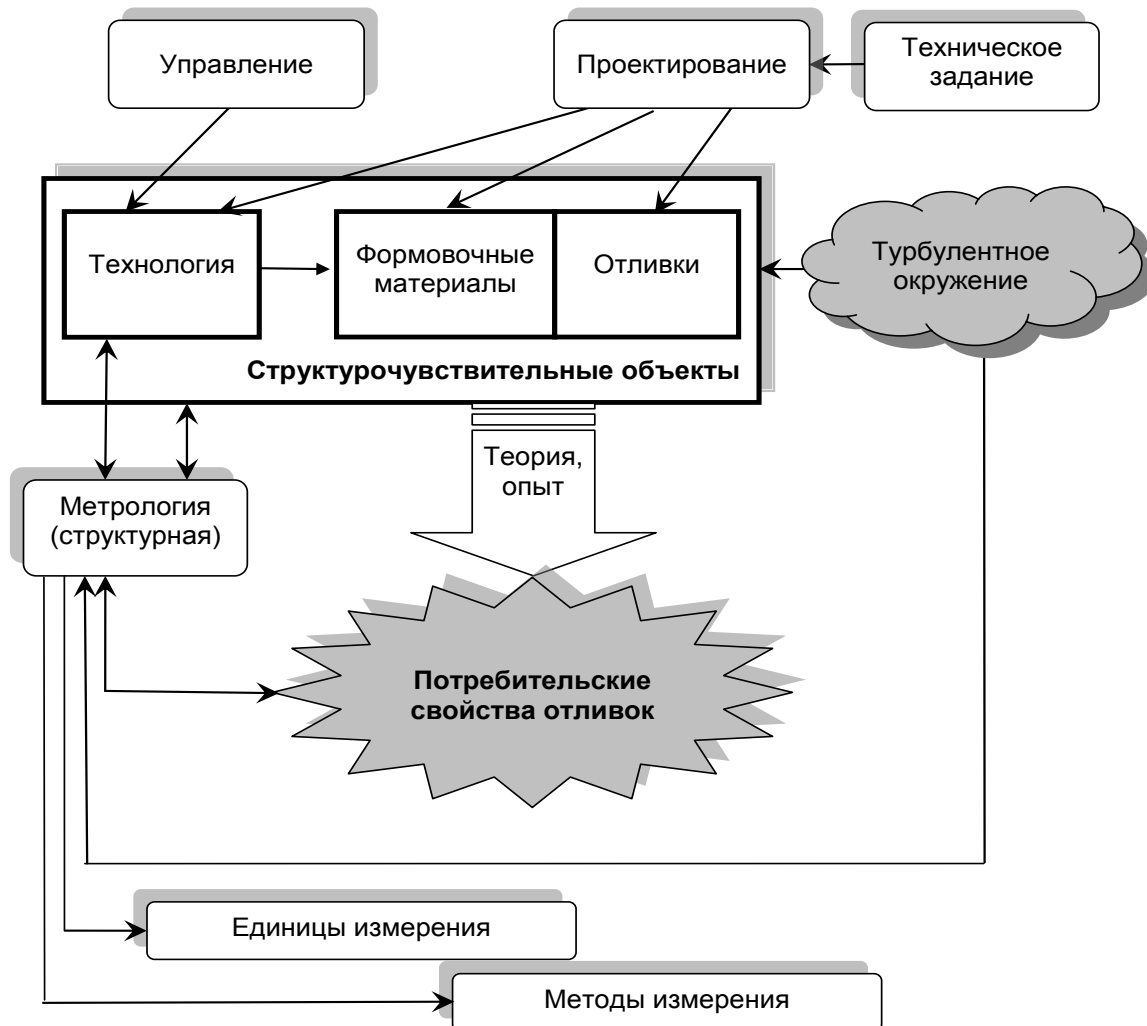


Рисунок 1 – Схема взаимодействия структуры материальных объектов литейного производства с САПР, АСУ, турбулентным окружением и потребительскими свойствами отливок

Важнейшей составляющей представленной схемы взаимодействия является метрологическая основа производства, развитие которой предопределяется новыми подходами к проектированию и анализу литейных технологий.

Для моделирования и количественной оценки структурной чувствительности материальных объектов использовали перколяционные модели, основанные на построении и анализе кластеров отдельных компонентов гетерогенных структур [10-12]. Такие модели позволяли

воспроизводить микро и макроособенности форм и отливок: поры, распределение связующего, добавки, различные технологические барьеры с переменной проницаемостью и многое другое.

Наличие перколяционного порога в процессе накопления добавок со свойствами, отличными от свойств основы, приводит при некоторой концентрации добавки к скачкообразному изменению свойств гетерогенной системы. При этом различные смеси в зависимости от переносимой субстанции (масса, электричество, тепло) ведут себя по-разному, например, достаточно одного электропроводного бесконечного кластера минимальной мощности, заместившего часть исходного неэлектропроводного кластера, чтобы изменить электропроводность на несколько порядков, что совершенно не характерно для теплопроводности.

Это объясняется существенным отличием электропроводности проводника и изолятора (миллионы раз) по сравнению с отличием в теплопроводности тех же материалов (единицы раз). Аналогичная причина приводит к резкому возрастанию проницаемости стенки после появления первой сквозной поры (кластера пор). Для того же, чтобы присутствие нового компонента стало заметным с точки зрения теплопроводности, нужно, чтобы его кластер (или кластеры) обладал заметной мощностью, что достигается введением нового компонента в концентрации, существенно превышающей перколяционный порог. Поэтому, при моделировании тепловых явлений в форме важными параметрами являются не только конечность кластеров, но и их мощность.

Таким образом, моделирование замещения компонентов с резко различными параметрами, значением которых у одного из компонентов можно пренебречь (например, газопроницаемостью сплошной стенки или электропроводностью хорошего изолятора), сводится к моделированию возникновения новых возможностей протекания там, где их раньше не было вообще.

На схеме, приведенной на рис. 2, показана типичная кривая изменения перколяционной характеристики формовочной смеси λ (например, теплопроводности) при добавлении в смесь с исходной теплопроводностью λ_1 второго компонента с характеристикой λ_2 .

На кривых такого рода можно выделить три характерных участка: $\Delta\alpha_1$ – добавка второго компонента практически не сказывается на перколяционной характеристике смеси, остающейся такой же, как и при $\alpha = 0$; $\Delta\alpha_2$ – «зона чувствительности» – добавка второго компонента приводит к изменению перколяционной характеристики от λ_1 до λ_2 ; $\Delta\alpha_3$ – добавка второго компонента практически не сказывается на перколяционной характеристике смеси, остающейся такой же, как и при $\alpha = 1$.

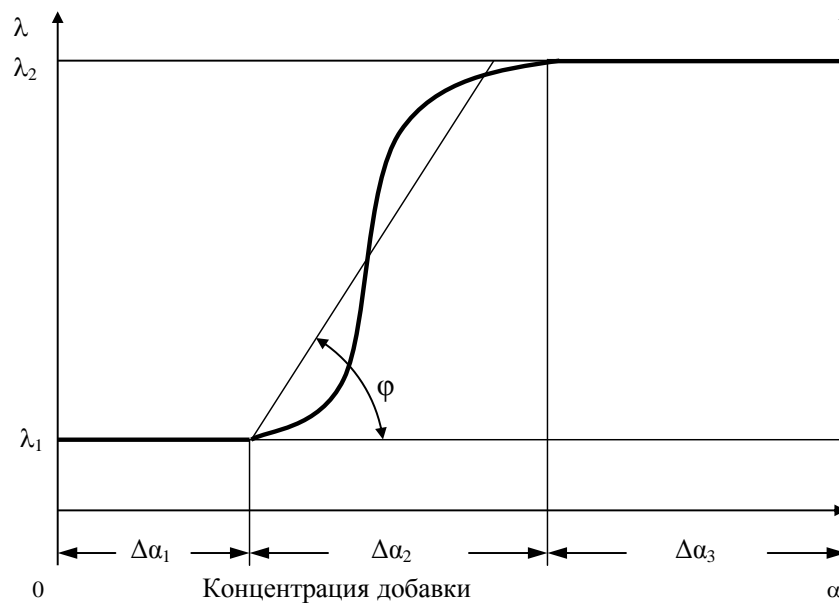


Рисунок 2 – Схема к анализу влияния разности коэффициентов протекания на ширину «зоны чувствительности»

Угол ϕ наклона прямой, аппроксимирующей кривую $\lambda(\alpha)$ на участке $\Delta\alpha_2$, однозначно связан с величиной «зоны чувствительности» и разницей в значениях перколяционных характеристиках компонентов соотношением:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\alpha_2} \quad (1)$$

Как показывает анализ реальных кривых $\lambda(\alpha)$ для различных свойств λ (теплопроводности, газопроницаемости, электропроводности) и различных компонентов смеси величина «зоны чувствительности» в значительной степени зависит также от разницы свойств $\lambda_2 - \lambda_1$. В настоящей работе такую зависимость искали в виде:

$$\Delta\alpha_2 = \frac{1}{K|\lambda_2 - \lambda_1| + 1} \quad (2)$$

При $\lambda_2 = \lambda_1$ $\Delta\alpha_2 = 1$, и изменение эффективной теплопроводности за счёт добавки не происходит (при прочих равных условиях). При $\lambda_2 \gg \lambda_1$ $\Delta\alpha_2 \rightarrow 0$, и изменение параметра переноса при образовании бесконечного кластера происходит практически скачком.

Определение величины K для конкретных составов и параметров представляет собой практическую задачу для пользователя системы перколяционного моделирования.

Схема взаимодействия технических и организационных ОЛП с потребительскими свойствами отливок представлена на рис. 3. Она включает два цикла воздействия: технический и организационный [9].

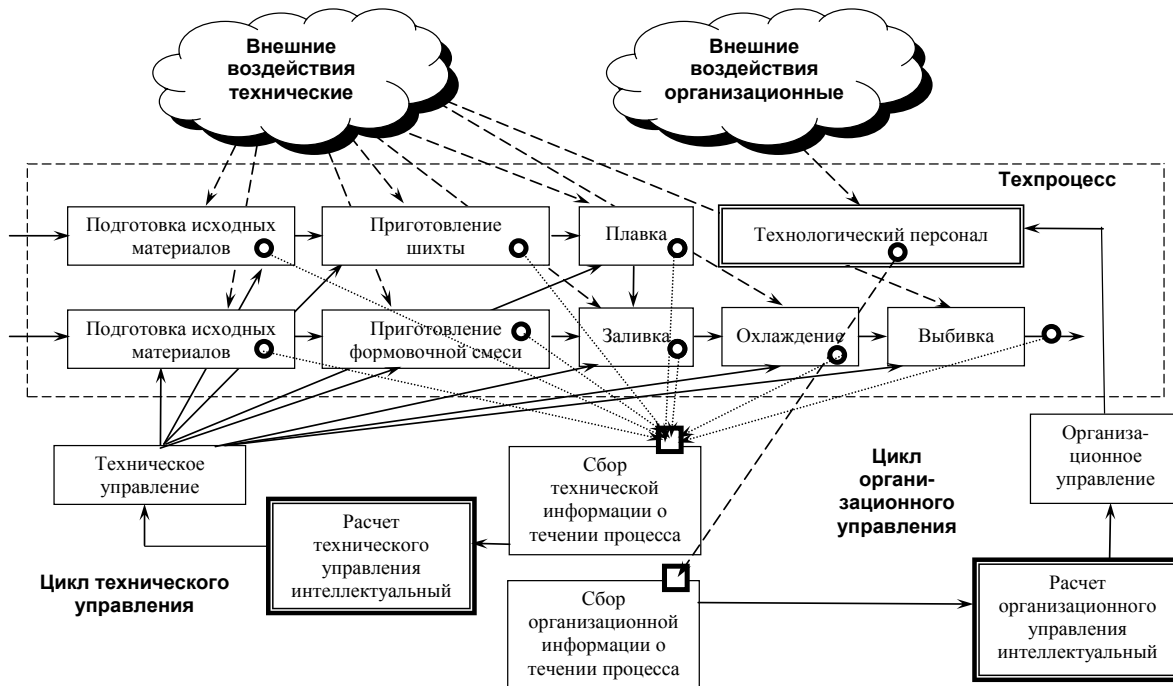


Рисунок 3 – Схема взаимодействия структуры технических и организационных объектов литейного производства с потребительскими свойствами отливок

Здесь построить модель взаимосвязи «объект литейного производства → структура → качество» значительно сложнее из-за отсутствия необходимой организационной информации или ее стохастичности, поэтому для моделирования на этом уровне использовали теорию фракталов. Для этого объекты литейного производства (ОЛП) рассматривали в качестве стохастических фракталов и ввели понятие *элемент объекта литейного производства* (ЭЛП). Сформулируем свойства такого ЭЛП:

– *самоподобие*: поскольку ЭЛП также являются фрактальным объектом, ему присуще свойство самоподобия: повторение фракталом самого себя на разных масштабных уровнях, т. е. неизменность закона построения фрактала; это означает, что основные атрибуты материалов,

оборудования и технологии ОЛП, распространяются не только на сам объект, но и все его ЭЛП;

– основные процессы ЭЛП: проектирование, изготовление, эксплуатация и списание представлены как в самом ОЛП, так и в любом его ЭЛП;

– основные понятия ЭЛП: качество, стоимость, экологичность и др., а также их взаимосвязи сохраняются как для ОЛП в целом, так и для его ЭЛП любого масштаба.

Использование фрактальной модели, с одной стороны, позволяет абстрагироваться от конкретного содержания ОЛП и всех его ЭЛП разного уровня и, с другой стороны, – использовать фрактальные характеристики ОЛП для оценки его структурной чувствительности [2, 13, 14]. В частности, в настоящей работе для этого использовали такую характеристику фракталов, как энтропийную фрактальную размерность.

Выводы. В работе предложены методы и модели оценивания структурной чувствительности всех компонентов литейного производства: материалов, оборудования, технологии и организации производства с точки зрения качества выпускаемых отливок и намечены пути развития автоматизированных систем проектирования и управления, а также метрологической базы литейных предприятий.

Список использованных источников: 1. Прокопович, И.В. Определение вероятности образования транзитной графитовой поры в структуре серого чугуна/ И.В.Прокопович, Ф.М.Грайжевский // Труды Одесского политехнического университета. –1997. –Вып. 1. –С. 25 –26. 2. Доний, А.Н. Фрактальные имитационные модели эволюции структуры материалов в процессе фазовых превращений/ А.Н. Доний, В.Ю. Алексеев // Сборник научных и методических трудов КПИ к 50-летию инженерно-физического факультета. Часть 2. –К.: КПИ, 1994. –С. 47 –51. 3. Становский, А.Л. Структурочувствительные формовочные материалы / А.Л. Становский, Г.В. Кострова, В.Н. Пурич // Моделирование в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1998. – С. 14 –16. 4. Кострова, Г.В. Моделирование высокоинтенсивной теплопередачи через пористые среды с источником и стоком тепла / Г.В. Кострова, В.Н. Рубанович // Моделирование в научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1997. –С. 39 –41. 5. Балан, С.А. Перколяционный анализ структурочувствительных формовочных материалов / С.А. Балан, Г.В. Кострова, В.Н. Пурич // Труды ОПУ. –2000. –Вып. 1(10). –С. 8 –11. 6. Гергега, А.Н. Бумажный фильтр как перколяционная система / А.Н. Гергега, С.Н. Мороз // Применение вычислительной техники и математического моделирования в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1995. –С. 39. 7. Пурич, В.Н. Технологические методы управления проницаемостью песчаных литейных форм/ В.Н. Пурич // Моделирование в прикладных научных исследованиях. –Одесса: ОГПУ, 1998. –С. 11 –12. 8. Кострова, Г.В. Управление свойствами структурочувствительных гетерогенных литейных материалов/ Г.В. Кострова, В.В. Новиков, В.Н. Рубанович // Труды ОПУ. –1998. –Вып. 1(5). –С. 8 –10. 9. Прокопович, И.В. Система интеллектуального мониторинга процесса литья / И.В. Прокопович, А.А. Коряченко, И.И. Становская // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. –Одеса, 2011. –Вип.

44.–С. 278 –282. **10.** Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах/ Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков –Л.: Энергоатомиздат, 1991. –248 с. **11.** Становский, А.Л. Модельный эксперимент на взаимопроникающих кластерах замещения в литейной форме/ А.Л. Становский, В.Н. Пурич, А.Г. Онищенко // Труды ОПУ. –1999. –Вып. 1(7). –С. 8 –10. **12.** Лысенко, Т.В. Применение структурных идентификаторов в литейном производстве / Т.В. Лысенко, И.В. Прокопович, А.А. Коряченко. –Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. –Харків, НТУ «ХПІ», 2011. –Вип. 1(21). –С. 185 –190. **13.** Соколов, И.М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания / И.М. Соколов // УФН. –1986. –Т.150. –Вып. 2. –С. 221 –255. **14.** Gerega, A.N. Моделирование переноса на макроуровне / А.Н. Gerega, Г.В. Кострова, А.Л. Становский // Новые методы моделирования в машиностроении. –Одесса: ОАПНТИЭИ, 1993. –С. 8 –12.

Bibliography (transliterated): 1. Prokopovich, I.V. Opredelenie verojatnosti obrazovanija tranzitnoj grafitovoj pory v strukture serogo chuguna/ I.V.Prokopovich, F.M.Grajzhevskij // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. –1997. –Vyp. 1. –S. 25 –26. 2. Donij, A.N. Fraktal'nye imitacionnye modeli jevoljucii struktury materialov v processe fazovyh prevrashhenij/ A.N. Donij, V.Ju. Alekseev // Sbornik nauchnyh i metodicheskikh trudov KPI k 50-letiju inzhenerno-fizicheskogo fakul'teta. Chast' 2. –K.: KPI, 1994. –S. 47 –51. 3. Stanovskij, A.L. Strukurochuvstvitel'nye formovochnye materialy / A.L. Stanovskij, G.V. Kostrova, V.N. Purich // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1998. – S. 14 –16. 4. Kostrova, G.V. Modelirovanie vysokointensivnoj teploperedachi cherez poristye sredy s istochnikom i stokom tepla / G.V. Kostrova, V.N. Rubanovich // Modelirovanie v nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1997. –S. 39 –41. 5. Balan, S.A. Perkoljacionnyj analiz strukurochuvstvitel'nyh formovochnyh materialov / S.A. Balan, G.V. Kostrova, V.N. Purich // Trudy OPU. –2000. –Vyp. 1(10). –S. 8 –11. 6. Gerega, A.N. Bumazhnyj fil'tr kak perkoljacionnaja sistema / A.N. Gerega, S.N. Moroz // Primenenie vychislitel'noj tehniky i matematicheskogo modelirovanija v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1995. –S. 39. 7. Purich, V.N. Tehnologicheskie metody upravlenija pronicaemost'ju peschanyh litejnyh form/ V.N. Purich // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. –Odessa: OGPU, 1998. –S. 11 –12. 8. Kostrova, G.V. Upravlenie svojstvami strukurochuvstvitel'nyh geterogennyh litejnyh materialov/ G.V. Kostrova, V.V. Novikov, V.N. Rubanovich // Trudy OPU. –1998. –Vyp. 1(5). –S. 8 –10. 9. Prokopovich, I.V. Sistema intellektual'nogo monitoringa processa lit'ja / I.V. Prokopovich, A.A. Korjachenko, I.I. Stanovskaja // Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi. –Odesa, 2011. –Vip. 44. –S. 278 –282. 10. Dul'nev, G.N. Processy perenosa v neodnorodnyh sredah/ G.N. Dul'nev, V.V. Novikov –L.: Jenergoatomizdat, 1991. –248 s. 11. Stanovskij, A.L. Model'nyj jeksperiment na vzaimopronikajushhix klasterah zameshenija v litejnoj forme/ A.L. Stanovskij, V.N. Purich, A.G. Onishhenko // Trudy OPU. –1999. –Vyp. 1(7). –S. 8 –10. 12. Lysenko, T.V. Primenenie strukturnykh identifikatorov v litejnom proizvodstve / T.V. Lysenko, I.V. Prokopovich, A.A. Korjachenko. –Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zbirnik naukovih prac'. –Harkiv, NTU «HPI», 2011. –Vip. 1(21). –S. 185 –190. 13. Sokolov, I.M. Razmernosti i drugie geometricheskie kriticheskie pokazateli v teorii protekanija / I.M. Sokolov // UFN. –1986. –T.150. –Vyp. 2. –S. 221 –255. 14. Gerega, A.N. Modelirovanie perenosa na makrourovne / A.N. Gerega, G.V. Kostrova, A.L. Stanovskij // Nove metody modelirovanija v mashinostroenii. –Odessa: OAPNTiJeI, 1993. –S. 8 –12.