

О.С. Савельева, канд. техн. наук, А.В. Андросюк,  
Е.Ю. Лебедева, Одесса, Украина

## **МОДЕЛЬ РЕОЛОГИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ**

*Запропоновано систему технічної діагностики, засновану на динамічній марковській моделі процесів переміщення компонентів гетерогенних матеріалів при їхньому зберіганні, обробці, перемішуванні, транспортуванні, заповненні ними ливарних форм, що дозволило знизити невиробничі витрати технологічних сумішей та їх компонентів, а також підвищити якість продукції, що випускається.*

*Предложена система технической диагностики, основанная на динамической марковской модели процессов перемещения компонентов гетерогенных материалов при их хранении, обработке, перемешивании, транспортировке, заполнении ими литейных форм, что позволило снизить производственные потери технологических смесей и их компонентов, а также повысить качество выпускаемой продукции.*

**O.S. SAVELYEVA, A.V. ANDROSYUK, E.YU. LEBEDEVA  
MODEL OF RHEOLOGY HETEROGENEOUS STREAMS**

*The system of technical preliminary treatment based on the dynamic Markov model of heterogeneous materials components conveyance processes at their storage, processing, hashing, transportation, filling with them of casting molds is offered that has allowed to lower non-productive losses of technological mixtures and their components, and also to raise quality of exhausted production.*

Дисперсные системы – гетерогенные системы из двух или большего числа фаз с сильно развитой поверхностью раздела между ними. Обычно одна из фаз образует непрерывную дисперсионную среду, в объеме которой распределена дисперсная фаза (или несколько дисперсных фаз) в виде мелких кристаллов, твердых аморфных частиц, капель или пузырьков. Дисперсные системы могут иметь и более сложное строение, например, представлять собой двухфазное образование, каждая из фаз которого, будучи непрерывной, проникает в объем другой фазы.

К таким системам относятся твердые тела, пронизанные разветвленной системой каналов-пор, заполненных газом или жидкостью, некоторые микрогетерогенные полимерные композиции и др. Нередки случаи, когда дисперсионная среда «вырождается» до тончайших слоев (пленок), разделяющих частицы дисперсной фазы.

Наиболее ответственным этапом технологического процесса изготовления изделий из композиционных материалов является заполнение формообразующей оснастки: опалубки, литейной формы и т.п. На этом этапе закладываются основные показатели качества готового изделия, определяется, будет ли оно годным, закладываются его свойства, внешний вид. Поэтому реологические характеристики исходной смеси существенно влияют на перечисленные показатели.

В то же время, реология гетерогенных материалов, как правило, не может быть описана ни законами гидравлики, ни моделями, применяемыми в механике грунтов для сыпучих материалов, поскольку, зачастую, такие исходные смеси содержат разнородные по размерам, конфигурациям, агрегатным состояниям компоненты, изменяющие в процессе перемещения основные физические свойства, например, вязкость.

Основной проблемой при проектировании технологии изготовления изделий из гетерогенных материалов с существенно различающимися компонентами (бетоны и железобетоны, синтегран и т.п.) является отсутствие адекватных структурных имитационных моделей, на входе которых – характеристики процессов перемешивания таких материалов, заполнения ими соответствующих форм, а также процессов их химического либо физического затвердевания, а на выходе – структурозависимые свойства будущих изделий: плотность, пористость, воздухо- и влагонепроницаемость, изотропность, прочность, ударная вязкость, способность к вибропоглощению и др.

Существующие структурные модели взаимопроникающих компонентов гетерогенных материалов представляют собой, чаще всего, трехмерный объем, заполненный параллелепипедами различных размеров, моделирующими твердые компоненты смеси, и свободным пространством между этими параллелепипедами, моделирующим поры [1, 2].

Недостатком такого представления является, во-первых, несоответствие формы реальных компонентов параллелепипедам, во-вторых, их взаимная неподвижность, что исключает моделирование реологии, а также отсутствие учета изменения внешних воздействий на элементы и их физических свойств в процессе перемещения.

Известны из литейного производства модели, в которых учитывается перемещение масс исходных материалов под действием внешних сил, но и их возможности весьма ограничены, т.к. они не учитывают существенные разнородности размеров элементов исходных материалов [3, 4]. С другой стороны, модели, применяемые в механике грунтов, также, к сожалению, не учитывают изменение свойств, происходящих со связующими материалами исходных смесей при их затвердевании [5, 6].

Развивающееся в последнее время представление о структурных превращениях, основанное на математическом аппарате марковских процессов, требует «обучения» модели на реальных событиях, так как реальные значения вероятностей марковских переходов должны коррелировать с фактическими событиями, происходящими при течении гетерогенных сред [7, 8].

Целью настоящей работы является создание адекватной динамической модели заполнения пространства форм и последующего уплотнения под действием разнообразных сил (гравитации, вибрации, центробежных и т.д.), использующей в процессе решения разнообразных задач теорию марковских процессов.

Реалогия исходных композиционных материалов, используемых при изготовлении изделий в строительстве, машиностроении, и т.д., осложняется тем, что такие материалы зачастую содержат компоненты, находящиеся в трех агрегатных состояниях (твердое, жидкое, газообразное), причем как сами состояния, так и соответствующие этим состояниям свойства многих компонентов изменяются во времени.

Рассмотрим простой пример. Пусть двухмерная модель мгновенного состояния гетерогенной смеси имеет вид, представленный на рис. 1. На этом рисунке отдельная песчинка смеси соответствует одному квадрату сетки (рис. 1, а), один крупный элемент (например, кусок гравия) – постоянному сообществу таких клеток (рис. 1, б – д), а жидкости и газы, заполняющие поры между песком и гравием, представляют собой оставшееся пространство, условно разделенное на клетки того же размера.

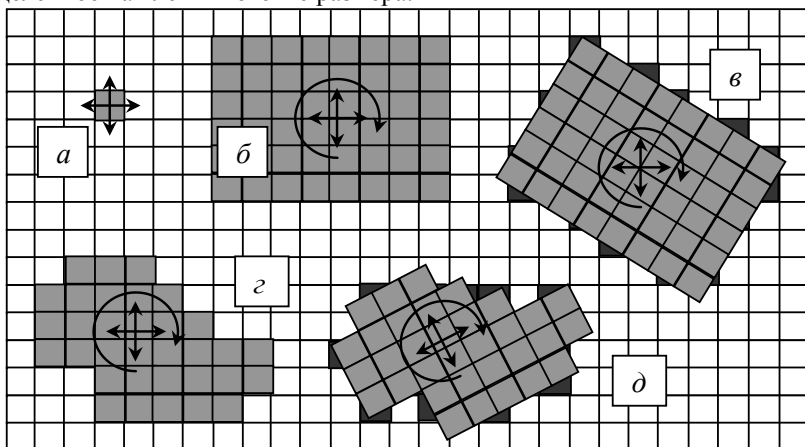


Рисунок 1 – Схема дискретизации пространства, заполненного моделями фракций композиционного материала

Изменением состояния системы считается изменение (перемещение) хотя бы одного ее элемента. Модель перемещения выглядит следующим образом: элемент с некоторыми свойствами в заданной клетке исчезает, элемент с таким же (для твердого или газообразного) или измененными (для жидкого) свойствами появляется в одной из четырех соседних ортогонально расположенных клеток.

Естественно, если элемент занимает площадь более одной клетки, то движение (поступательное, вращательное) таких клеток должно происходить совместно: на одну величину и в одном направлении.

Поворот одноклеточного элемента в модели не предусмотрен, а поворот сообщества элементов приводит к его распространению на те клетки, где перекрытие исходной сетки превышает 50 % ее площади (рис. 1, в, д).

Движение каждого элемента может происходить при наличии следующих обстоятельств:

- внешние силы достаточны для перемещения;
- свободно или легко освобождается пространство в направлении действующей силы, куда может переместиться моделируемый фрагмент;

Если для перемещения фрагмента место для его новой позиции должно быть освобождено от элементов других компонентов, то необходимо выполнить расчет, хватает ли внешней энергии, затрачиваемой на перемещение, чтобы преодолеть сопротивление и указанное освобождение все же произошло.

В соответствии с представлениями, приведенными на рис. 1, каждый квадратный элемент сетки может находиться в следующем состоянии:

- заполнен газом («пустой»);
- заполнен твердым телом (песчинка, фрагмент гравия);
- заполнен жидкостью (связующее – смола, цементный раствор – до застывания).

Марковская модель процесса изменения состояния ячейки представляет собой граф, в основании которого – одно из исходных состояний: незаполненная ячейка (рис. 2, а), ячейка, заполненная песчинкой (рис. 2, б), и ячейка, заполненная фрагментом гравия (рис. 2, в).

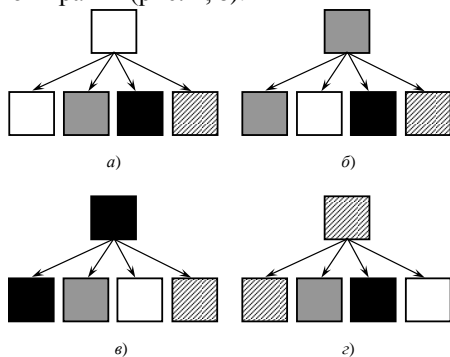


Рисунок 2 – Схема марковских переходов в состоянии ячейки модели:

- – «пустота» (заполнена воздухом);
- – заполнена песчинкой;
- – заполнена фрагментом гравия;
- ▨ – заполнена связующим

Любое изменение структуры осуществляется в результате перехода, происходящего с той или иной степенью вероятности, в значении которой «зашиты» перечисленные выше внешние воздействия и свойства материалов смеси. С помощью марковской модели на каждом шаге моделирования определяются все возможные состояния после каждой операции, вероятности перехода к этим состояниям и статистические характеристики времени, необходимые для завершения перехода.

Вязкость твердого состояния принимается равной бесконечности, вязкость газообразного – нулю, а вязкость жидкого состояния определяется на

каждой итерации моделирования в зависимости от реальных химических процессов твердения связующих (образование нерастворимых гидросиликатов цемента, поликонденсации смол и т.д.).

В результате использования предложенной модели удалось получить соотношения, связывающие реологические характеристики исходных смесей, параметры механизма их твердения, параметры внешних воздействий с технологически важными характеристиками технологического процесса. Так, например, для станкостроительного предприятия, использующего гетерогенный материал синтегран для изготовления станин металлорежущих станков, получены данные по стойкости исходной смеси к расслоению и затвердеванию, а также оптимальные амплитуды и частоты вибрационного воздействия на исходную смесь при заполнении ею формы.

Таким образом, в работе предложена динамическая марковская модель процессов перемещения компонентов гетерогенных материалов при их хранении, транспортировке, заполнении ими литейных форм, что позволило снизить непроизводительные потери смеси и ее компонентов, а также повысить качество выпускаемой продукции.

**Список использованных источников:** 1. Дульнев Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с. 2. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с. 3. Становский А.Л. Схемотехническое моделирование переноса в анизотропных средах / А.Л. Становский, Г.В. Кострова, Т.В. Лысенко // Материалы 4-й украинской конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 1997». – Черкассы: ЧИТИ, 1997. – с. 73. 4. Кострова Г.В. Схемотехнічне проектування у машинобудуванні / Г.В. Кострова, Т.В. Лисенко, О.Л. Становський. – Одеса: ОДПУ, 1994. – 147 с. 5. Орнатский Н.В. Механика грунтов. – М.: МГУ, 1950. – 420 с. 6. Николаевский В.Н. Механика насыщенных пористых сред / В.Н. Николаевский, К.С. Басниев, А.Т. Горбунов. – М.: Недра, 1970. – 339 с. 7. Кельберт М.Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. – М.: МЦНМО, 2009. – 588 с. 8. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

*Поступила в редколлегию 12.05.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Dul'nev G.N. Processy perenosa v neodnorodnyh sredah / G.N. Dul'nev, V.V. Novikov. – L.: Jenergoatomizdat, 1991. – 248 s. 2. Dul'nev G.N. Teploprovodnost' smesey kompozitsionnyh materialov / G.N. Dul'nev, Ju.P. Zarichnjak. – L.: Jenergija, 1974. – 264 s. 3. Stanovskij A.L. Shemotekhnicheskoe modelirovanie perenosa v anizotropnyh sredah / A.L. Stanovskij, G.V. Kostrova, T.V. Lysenko // Materialy 4-j ukrainskoj konferencii po avtomaticheskomu upravleniju «Avtomatika – 1997». – Cherkassy: ChITI, 1997. – s. 73. 4. Kostrova G.V. Shemotekhnichne proektuvannja u mashinobuduvanni / G.V. Kostrova, T.V. Lisenko, O.L. Stanov'skij. – Odesa: ODPU, 1994. – 147 s. 5. Ornatskij N.V. Mekhanika gruntov. – M.: MGU, 1950. – 420 s. 6. Nikolaevskij V.N. Mekhanika nasywennyh poristyh sred / V.N. Nikolaev-skij, K.S. Basniev, A.T. Gorbunov. – M.: Nedra, 1970. – 339 s. 7. Kel'bert M.Ja. Verojatnost' i statistika v primerah i zadachah. T. II: Markovskie cepi kak otpravnaja točka teorii sluchajnyh processov i ih prilozhenija / M.Ja. Kel'bert, Ju.M. Suhov. – M.: MCNMO, 2009. – 588 s. 8. Baj-hel't F. Nadezhnost' i tehničeskoe obsluživanje. Matematicheskij podhod / F. Bajhel't, P. Franken. – M.: Radio i svjaz', 1988. – 392 s.