

15. Фрактальная модель роста зерен при затвердевании сплавов / Ю. Н. Таран, А. И. Михалев, В. Е. Хрычиков, А. И. Деревянко // Современные проблемы металлургии. — 2001. — Т. 3. — С. 414-421.
16. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 260 с.
17. Смирнов Б. М. Физика фрактальных кластеров. — М.: Наука, 1991. — 134 с.
18. Соценко О. В. Исследование ранних стадий формирования графита в ЧШГ // Эвтектика. — Запорожье, 2003. — С. 180-182.
19. Соценко О. В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуна // Литейн. пр-во. — 1982. — № 6. — С. 5-7.
20. Смирнов Б. М. Фрактальные кластеры // Успехи физических наук. — 1986. — Т. 149, вып. 2. — С. 177-217.
21. Witten T. A., Sander L. M. Diffusion-limited aggregation as a kinetical critical phenomena // Phys. Rev. Lett. — 1981. — V. 47, №19. — P. 1400-1403.

**СОЦЕНКО О. В.** Комп'ютерна DLA-модель формування кулястого графіту у високоміцному чавуні

*Розглянута можливість застосування методів фрактальної геометрії до опису морфології включень кулястого графіту в чавуні. Показано, що глобулярні графітні включення є фрактальними структурами. Представлена фрактальна модель формування глобулярних включень графіту в чавуні по механізму дифузійно обмеженої агрегації. Показана тотожність структури включень графіту і моделей DLA.*

**SOTSENKO O.** Computer DLA-model of the formation of spheroidal graphite in high-strength cast-iron

*Possibility of application of methods of fractal geometry to description of morphology of including of spherical graphite in cast-iron is considered. It is shown that the spherical graphite including are fractal structures. The fractal model of forming of the spherical including of graphite in cast-iron on the mechanism of diffusive limited aggregation is represented. The identity of structure of including of graphite and the DLA.*

УДК 621.74

**В. П. Авдокушин, В. П. Самарай**

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫПУЧИХ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ВИБРОУПЛОТНЕНИИ**

*Представлена методика реологических исследований сыпучих формовочных смесей.*

**Ключевые слова:** качество литья, дефекты отливок, формовочные смеси, процессы перетекания, реологические модели, реологические свойства, экспертные системы, прогнозирование, диагностика, уплотнение стержней, вибрация

Прямое экспериментальное определение реологических параметров [1-6] сыпучих формовочных смесей, например, холодно-твердеющих смесей (ХТС) или песков вызывает значительные затруднения, состоящие в том, что в процессе испытаний происходит одновременное уплотнение смеси. С целью создания стабильных условий (постоянной плотности) при измерении реологических свойств вибрируемых дисперсных материалов с помощью приборов, основанных на сдвиговых деформациях, обычно прибегают к их предварительному уплотнению [1, 2] до постоянной плотности. Однако в этом случае решить поставленную в работе задачу, состоящую в определении эффективных значений реологических параметров при вибрировании смесей с различной плотностью, невозможно.

Поэтому в работе была использована методика, основанная на математической обработке данных о динамике уплотнения ХТС при различных режимах вибрирования.

На рис. 1 представлены кривые, показывающие изменение высоты пробы смеси (содержание смолы БС 1,2 %) в гильзе высотой 100 мм под действием различных виброускорений и с разной достигаемой плотностью.

На этих кривых можно достаточно четко выделить три фазы уплотнения [7-10]. Первая фаза характеризуется быстрым уменьшением высоты образца с практически постоянной скоростью, которая может быть определена по углу наклона начального прямолинейного участка кривой осадки. Вторая фаза – замедленное уплотнение, что обусловлено существенным возрастанием

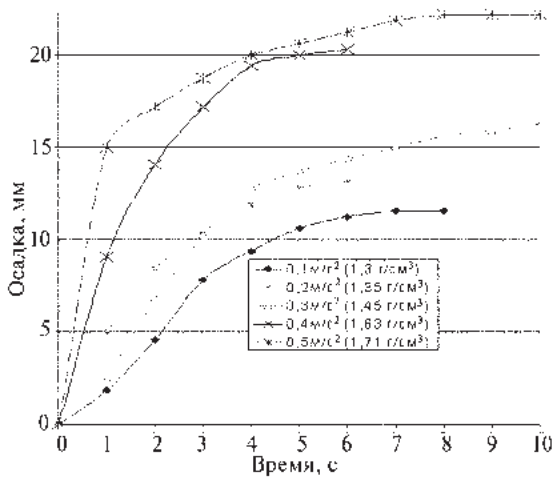


Рис. 1. Осадка смеси от времени виброуплотнения

сил внутреннего трения смеси вследствие повышения ее плотности. Третья фаза – стабилизация плотности (прекращение осадки образца), при которой достигается равновесие между уплотняющим воздействием и силами внутреннего трения смеси.

В соответствии с рассмотренной выше динамикой процесса уплотнения нарастание плотности в смеси начинается с нижних слоев, испытывающих наибольшее давление столба смеси. Если пренебречь влиянием затухания вибрационных колебаний по высоте образца вследствие его небольшой высоты, то изменение эффективного давления по высоте столба смеси можно считать основным фактором, обуславливающим замедление изменения высоты образца смеси во второй фазе.

Исходя из динамики послойного уплотнения смеси, можно считать, что в первой фазе уплотнение осуществляется, главным образом, за счет нижней части образца, в которой протекает практически стационарный процесс деформации при некоторых постоянных значениях реологических параметров. Основными реологическими параметрами при этом являются эффективная вязкость и предельное напряжение сдвига [10-26], так как именно они проявляются при необратимых вязко-пластических деформациях. Модуль упругости в этом смысле определяет характер распространения вибрационных колебаний по мере удаления от источника вибрации [22, 23].

При изучении процессов виброуплотнения бетонных смесей, которые по своим реологическим свойствам относятся к тому же

классу материалов, что и формовочные смеси, установлено, что время уплотнения смеси  $T$  линейно связано с ее вязкостью  $\eta$ :

$$\eta = \lambda T, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – постоянная для данного опыта.

Время уплотнения до достижения некоторой заданной плотности может служить косвенной оценкой эффективной вязкости смеси. При этом очевидно, что для снижения ошибок оценок вязкости целесообразно исходить из анализа процесса уплотнения, соответствующего первой фазе изменения высоты образцов, а текущие значения плотности определять по нижней части пробы. Поэтому в экспериментах для определения средней плотности использовали нижнюю часть пробы высотой 50 мм, то есть равной половине исходной высоты.

На рис. 2, 3 приведены зависимости, полученные путем обработки кривых осадки (рис. 1) и характеризующие функциональную связь между виброускорениями, эффективным значением плотности и временем уплотнения (эффективной вязкостью). Как следует из полученных данных (рис. 2), измене-

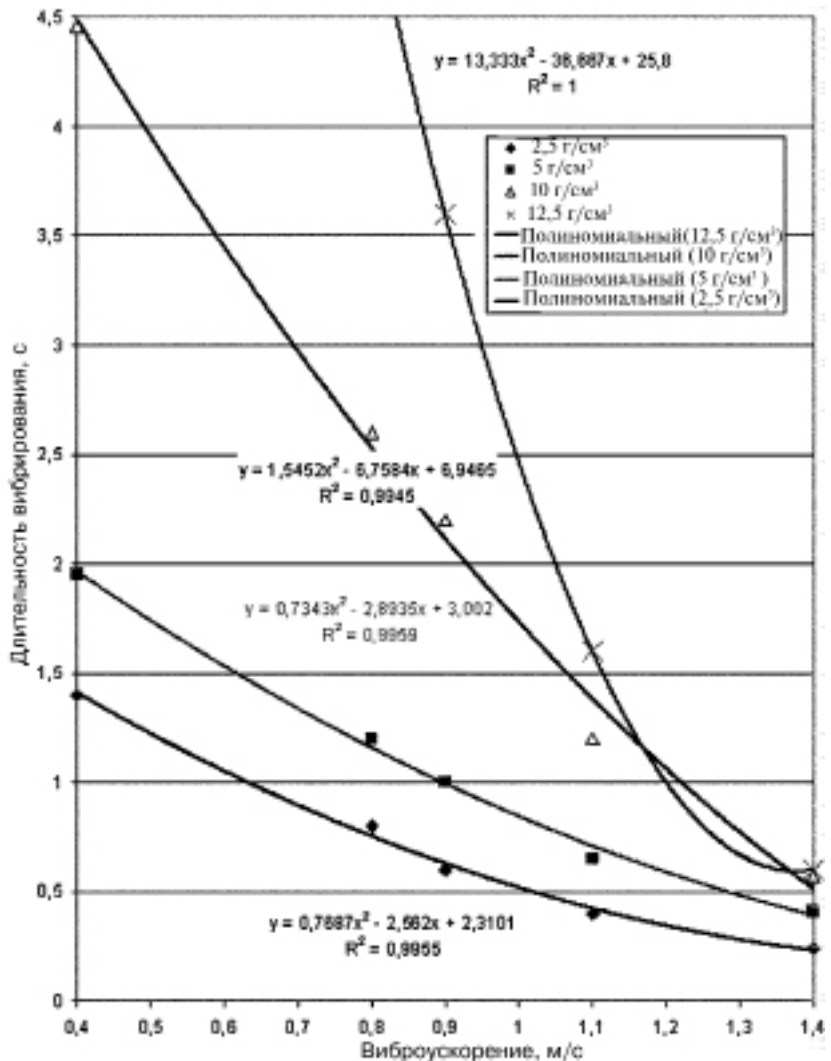


Рис. 2. Зависимости между виброускорениями, плотностью и временем уплотнения

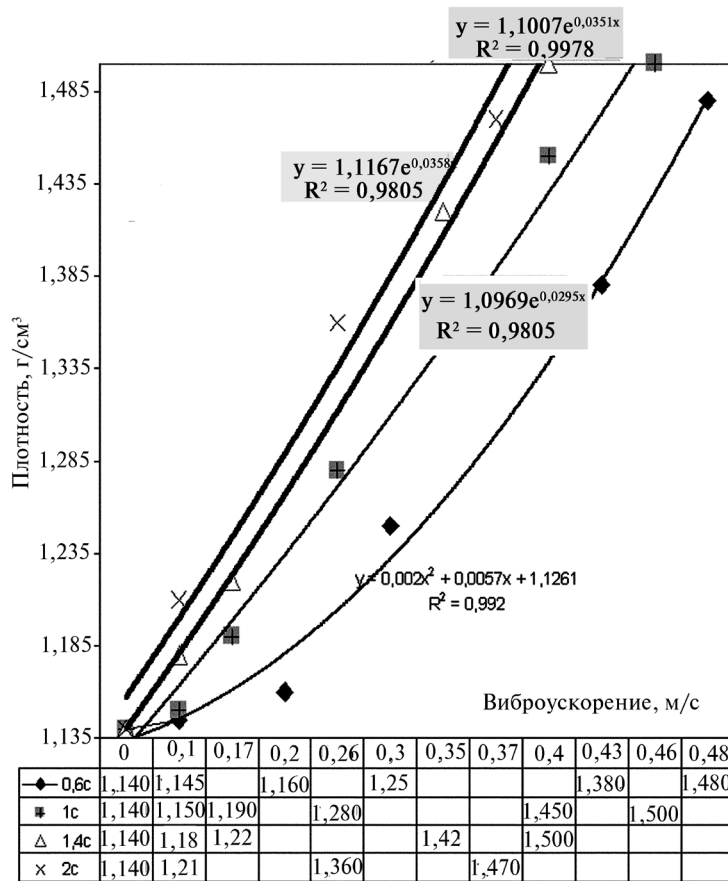


Рис. 3. Зависимость плотности от виброускорения при постоянном времени уплотнения

ние времени, за которое высота образца изменяется на постоянную величину от виброускорений имеет вид, характерный для известных зависимостей эффективной вязкости  $\eta$  от виброускорений  $\alpha$  и наиболее часто описываемых показательной

функцией. По мере возрастания виброускорения время уплотнения резко снижается и стремится к некоторому постоянному значению, соответствующему условиям вибрирования, когда вязкость снижается до минимального постоянного значения (пластическая вязкость дисперсной системы с полностью разрушенной структурой). Аналогичный вид кривых « $\eta$ - $\alpha$ » и « $T$ - $\alpha$ » подтверждает правильность сделанных предположений.

Для решения поставленной в работе задачи нужно установить функциональную связь эффективной вязкости, плотности вибрируемой смеси и виброускорения. Поэтому кривые рис. 2 необходимо рассматривать одновременно с зависимостями эффективной плотности от виброускорения при постоянном времени вибрирования, которые представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, функциональная связь между виброускорениями и эффективной плотностью на рассматриваемом этапе уплотнения носит нелинейный характер, причем нелинейность сильно проявляется при малых времени уплотнения и виброускорении, а затем зависимость переходит в линейную.

Для решения задачи о совместном влиянии эффективной плотности и виброускорения на эффективную вязкость составлена табл. 1, в которую занесены данные, соответствующие кривым рис. 2 и 3.

Влияние эффективной плотности вибрируемой смеси и виброускорения можно оценить, исходя из следующих соображений. Если эффективная вязкость смеси оказывает влияние на ско-

Таблица 1  
Функциональная зависимость между виброускорениями, эффективной плотностью и временем уплотнения

Виброускорение, м/с <sup>2</sup>	Длительность вибрирования, с	Эффективная плотность, г/см <sup>3</sup>	Изменение высоты ( $\Delta H$ ), мм
0,4	1,40	1,180	2,5
	1,95	1,210	5,0
	4,46	1,277	10,0
0,8	0,8	1,19	2,5
	1,2	1,22	5,0
	2,6	1,29	10,0
0,9	0,6	1,250	2,5
	1,0	1,280	5,0
	2,2	1,355	10,0
1,1	3,6	1,390	12,5
	0,40	1,33	2,5
	0,65	1,37	5,0
1,4	1,20	1,44	10,0
	1,60	1,48	12,5
	0,24	1,36	2,5
	0,41	1,40	5,0
1,4	0,57	1,48	10,0
	0,60	1,52	12,5

рость уплотнения, то для тела Бингама описывается уравнениями (2) или (3).

Деформация, вызываемая сжимающими нормальными напряжениями  $\sigma_1$ , в общем случае и для модели Бингама, без учета модуля упругости определяется по уравнениям

$$\sigma_1 = \vartheta_{эф} + \eta_{эф} V'$$

или

$$\varepsilon = \sigma_1 / F(\vartheta_{эф}, \eta_{эф}, E_{эф}) = (\sigma_1 - \vartheta_{эф}) t / \eta_{эф}, \quad (2)$$

где  $V'$  – скорость деформации;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $t$  – время,  $F(\vartheta_{эф}, \eta_{эф}, E_{эф})$  – реологическая модель формовочной смеси;  $\vartheta_{эф}, \eta_{эф}, E_{эф}$  – эффективные значения предельного напряжения сдвига (предела текучести), вязкости и модуля упругости формовочной смеси.

Для касательного напряжения в дифференциальной форме

$$\tau_{\max} = \Theta + \eta dv/dt. \quad (3)$$

При прекращении деформации, то есть когда  $dv/dt = 0$ , действующее напряжение уравновешивается только предельным напряжением сдвига

$$\tau = \Theta. \quad (4)$$

Оценить действующее напряжение после окончания осадки смеси можно следующим путем. Действующее напряжение определяется по формуле

$$\tau = \rho H (g + \alpha \omega^2 \sin \omega t) / S, \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая частота вибрации,  $\rho$  – плотность смеси;  $\alpha$  – виброускорение;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – высота слоя смеси.

Максимальных значений напряжение достигает при  $\sin \omega t = 1$ , поэтому

$$\tau_{\max} = \rho H (g + \alpha) / S. \quad (6)$$

Поверхность сдвига при уплотнении пробы смеси в цилиндрической гильзе составит

$$S = 2 \pi R H. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \tau_{\max} &= \rho H (g + \alpha) / 2 \pi R H = \\ &= \rho (g + \alpha) / (2 \pi R). \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая, что это напряжение уравновешивается предельным напряжением сдвига, а также вводя поправочный коэффициент  $k$  получим

Таблица 2

Расчетные значения величины  $\Theta/k$  в зависимости от виброускорения и плотности смеси с 1,2 % БС-40

Виброускорение ( $\alpha$ ), м/с <sup>2</sup>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Приведенная плотность ( $\rho$ ), г/см <sup>3</sup>	1,3	1,35	1,45	1,63	1,72
Расчетное значение предельного напряжения сдвига ( $\Theta/k$ ), Па	819,8	859,9	932,8	1058,9	1128,4

$$\Theta = k \tau_{\max} = k \rho (g + \alpha) / (2 \pi R) \quad (9)$$

или для принятых размеров оснастки

$$\Theta = k \rho (g + \alpha) / (2 \pi \cdot 2,5) = k \rho (g + \alpha) / 15,7. \quad (10)$$

Расчетные значения величины  $\Theta/k$  и  $\Theta$  приведены в табл. 2 и на графиках рис. 4 и 5.

Коэффициент  $k$  определяется из сопоставления данных рис. 4 и 5 по результатам динамических и статических испытаний (когда  $\alpha = 0$ ). В этом случае имеем

$$\Theta(\rho) = k \rho g / 15,7 \quad (11)$$

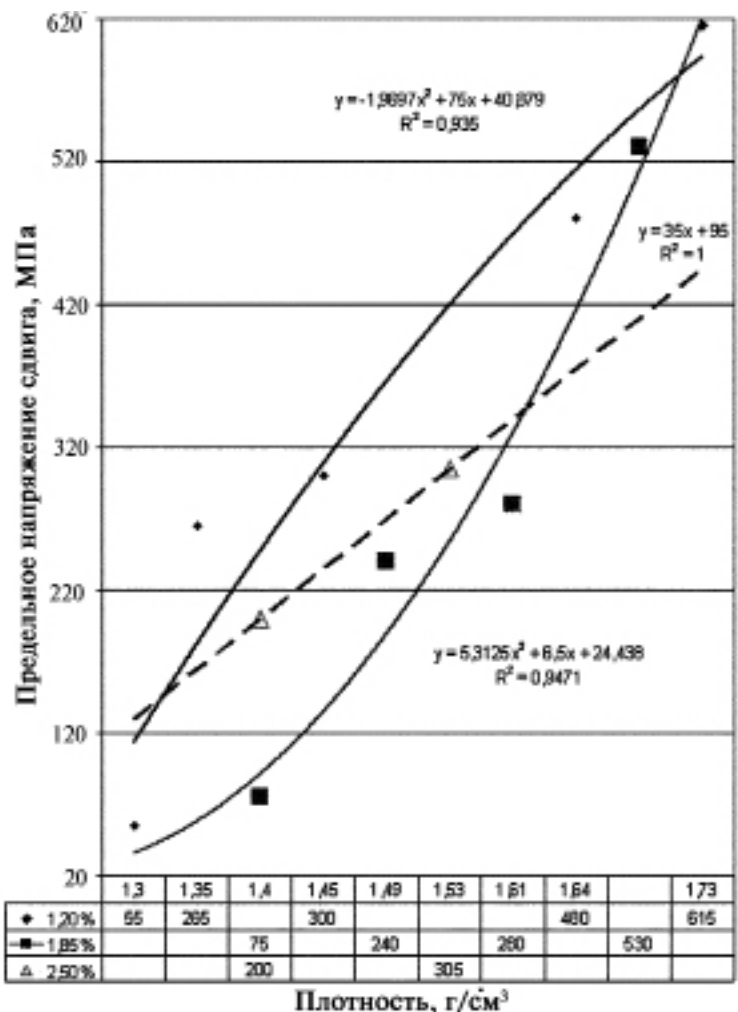
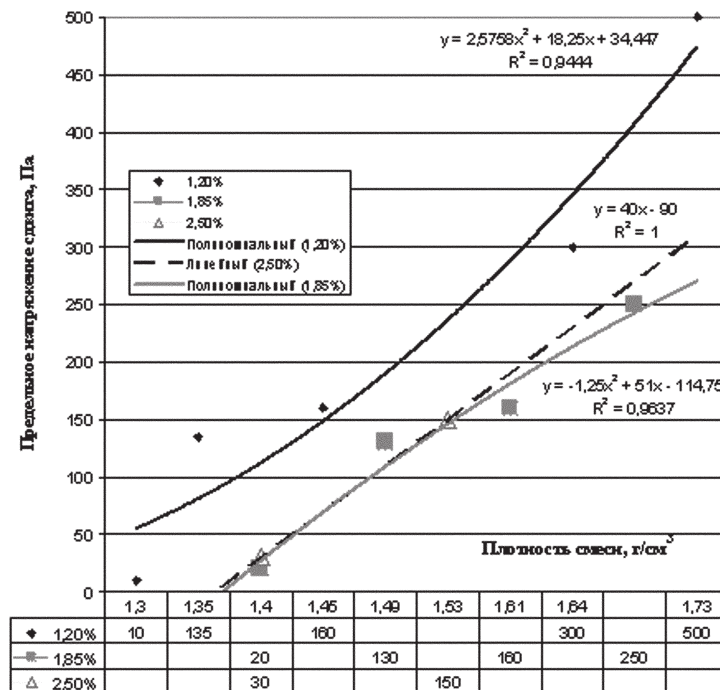


Рис. 4. Зависимость предельного напряжения сдвига от плотности смеси при различном содержании связующего БС-40





**Рис. 5.** Зависимость предельного напряжения сдвига от плотности для динамических испытаний при различном содержании связующего БС-40. Расчетные значения величины  $\Theta/k$  и  $\Theta$  приведены в табл. 2 и на графиках рис. 4 и 5

и тогда

$$k = 15,7 \Theta (\rho) / \rho g . \quad (12)$$

Значение  $\Theta (\rho)$  получаем непосредственно из измерений реологических свойств смесей с различной плотностью или рассчитываем по зависимостям, полученным в (10) при помощи данных табл. 2.

### Выводы

Представленная методика позволяет проводить реологические исследования сыпучих формовочных смесей и наполнителей (например, песка), применяемых для виброуплотнения при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ), при

вакуум-пленочной формовке (ВПФ), при литье по выплавляемым моделям (ЛВМ), при изготовлении отливок стоматологических протезов (методами ЛВМ и «по огнеупорным моделям»). Полученные таким способом реологические свойства необходимы для оценки технологических свойств формовочных смесей, для использования в программах моделирования их уплотнения при изготовлении форм и стержней, что, в свою очередь, позволяет методами экспертных систем своевременно прогнозировать и диагностировать вероятность появления различных дефектов отливок, связанных с качеством и степенью уплотнения форм.



### Литература

1. Авдокушин В. П., Сургучев Е. А., Клец Ю. К. Прибор для определения реологических свойств формовочных смесей // Литейн. пр-во. — 1988. — № 5. — С. 15-16.
2. Авдокушин В. П., Сургучев Е. А., Самарай В. П. Прибор для определения реологических свойств формовочных смесей // Там же. — 2001. — № 4. — С. 33-34.
3. Матвеев И. В., Иванов Е. И., Резчиков Н. И. Реологические испытания формовочных смесей // Там же. — 1977. — № 12. — С. 11-12.
4. Матвеев И. В., Илюхин В. Д., Иванов Е. И. Экспериментальное исследование реологических закономерностей формовочной смеси при изотропном сжатии // Там же. — 1979. — № 1. — С. 15-16.
5. Матвеев И. В., Бельчук В. С. Реологические основы испытаний формовочных смесей и импульсного уплотнения. — М.: МАСИ, 1991. — 87 с.
6. Вербицкий В. И., Горбачев К. А., Конышев А. В. Реологические исследования формовочной смеси // Там же. — 2004. — № 6. — С. 8-12.
7. Болдин А. Н. О динамике формовочных процессов при встряхивании // Литейн. пр-во. — 2003. — № 10. — С. 37.
8. Болдин А. Н. Закономерности динамического уплотнения // Там же. — 1997. — № 3. — С. 23.
9. Иванов В. В., Иваненко В. Ф., Дмитриев Э. А. Поведение формовочной смеси во время ее уплотнения встряхиванием // Там же. — 2000. — № 3. — С. 34-35.

10. Самарай В. П. Моделирование уплотнения литейных форм и прогнозирование дефектов отливки: Дис. ... канд. техн. наук. - Киев: КПИ, 2006. — 344 с.
11. Авдокушин В. П., Дорошенко С. П., Сургучев Е. А., Ахонин С. В. Моделирование реологических свойств формовочных смесей // Литейн. пр-во. — 1986. — № 3. — С. 13-14.
12. Матвеев И. В. Реологические вязко-упругие характеристики формовочных смесей // Там же. — 2001. — № 12. — С. 11-13.
13. Шеклеин Н. С. О реологических факторах управления качеством литейной формы // Там же. — 2004. — № 6. — С. 13-16.
14. Матвеев И. В. Реологическая концепция и требования к АСУТП смешеприготовления и формообразования // Там же. — 1990. — № 10. — С. 13-15.
15. Матвеев И. В., Исагулов А. З. Управление качеством песчано-глинистых форм // Там же. — 1999. — № 5. — С. 21-23.
16. Карпов Ю. И. Напряженно-деформированное состояние формовочных смесей при динамическом нагружении // Там же. — 2001. — № 10. — С. 11-12.
17. Коротченко А. Ю. Математическая модель для расчета уплотнения сырых песчаных смесей // Там же. — 2000. — № 8. — С. 10-11.
18. Коротченко А. Ю. К теории уплотнения сырых песчано-глинистых смесей // Там же. — 1995. — № 11. — С. 26-29.
19. Вербицкий В. И. Построение и исследование динамической модели прессовой формовочной машины // Литейн. пр-во. — 2000. — № 8. — С. 35-39.
20. Иванов В. В., Дмитриев Э. А., Кабалдин Ю. Г. Математическое моделирование процесса уплотнения литейных форм встряхиванием // Там же. — 2000. — № 3. — С. 52-53.
21. Формовочные материалы и смеси / С. П. Дорошенко, В. П. Авдокушин, К. Русин и др. - Киев: Вища шк., 1990. — 416 с.
22. Комаров Л. Е. Об уплотнении литейных форм прессованием, вибропрессованием и вибрацией // Литейн. пр-во. — 1957. — № 11. — С. 10-15.
23. Горский А. И., Иванов-Эмин Е. Б., Косичкин О. Н., Гавриленко Т. А. Об упругих свойствах песчано-глинистых смесей при статическом и динамическом нагружении // Там же. — 1968. — № 12. — С. 22.
24. Шуляк В. С. Уплотнение формы при литье по газифицируемым моделям // Там же. — 1999. — № 5. — С. 30-32.
25. Авдокушин В. П., Дорошенко С. П., Елтышев В. Н. Применение вибрации в литейном производстве. - Киев: Общество «Знание», 1979. — 24 с.
26. Матвеев И. В., Комаров Л. Е., Шеклеин Н. С. Автоматизированное проектирование оптимальных составов формовочной смеси // Литейн. пр-во. — 1986. — № 3. — С. 31-32.

**АВДОКУШИН В. П., САМАРАЙ В. П.** Дослідження реологічних властивостей сипких формувальних сумішей при віброуцільненні

*Приведена методика реологічних досліджень сипких формувальних сумішей.*

**AVDOKUSHIN V., SAMARAY V.** The resech of rheological propertis of loose (friable) forming sands by the compaction with the help of the vibration

*Methodis of rheological reserches of loose (friable) forming sands are present.*

## **ВНИМАНИЕ!**

*Журнал «Металл и литье Украины» практикует выпуск рекламных номеров для экспонирования на международных симпозиумах, выставках-ярмарках и т. п. Стоимость рекламно-информационного спецвыпуска, целиком посвященного предприятию (фирме)-заказчику, – 7000 грн.*