

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СВС-ТЕХНОЛОГИЙ\*

А. М. Столин, Л. С. Стельмах

*ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем  
материаловедения РАН (ИСМАН)», г. Черноголовка; stelm@ism.ac.ru*

**Ключевые слова и фразы:** вязкость; горение; деформация; математическое моделирование; пористый материал; реодинамическая модель; СВС-компактирование; СВС-экструзия; сжимаемый материал; тепловая модель.

**Аннотация:** Предложены основные принципы математического моделирования процессов СВС-компактирования при получении готовых изделий. Изложены общие подходы, идеи и приемы математического моделирования, необходимые для технологии СВС и для других процессов химической технологии. Приведены примеры успешного использования математического моделирования для конкретных практических рекомендаций и прогноза возникновения проблемных ситуаций в технологической практике СВС-компактирования.

---

### Введение

Около 30 лет назад, по предложению А. Г. Мержанова и при его непосредственном участии были начаты исследования, связанные с разработкой новых технологических процессов СВС, основанных на сочетании горения и сдвигового деформирования горячих продуктов синтеза: прессование, экструзия, наплавка и измельчение и др. [1, 2]. Первые эксперименты по отработке экспериментальных схем процессов выявили необходимость попадания технологических параметров в оптимальную область. Весьма эффективным оказался метод математического моделирования. Работы в этой области развивались по следующим направлениям:

– разработка тепловых моделей СВС-экструзии и прессования, позволяющих рассчитывать температурные поля, возникающие как в материале образца, так и в элементах пресс-оснастки [3, 4];

– разработка неизоотермических реодинамических моделей СВС-компактирования, которые учитывали реологическое поведение материалов и позволяли изучить температурный режим, а также кинетику уплотнения и напряженно-деформированное состояние материала [5 – 7];

– применение тепловых и реодинамических моделей в конкретных практических приложениях при получении различных изделий методами СВС-компактирования [8, 9];

– разработка неизоотермических методов расчета пресс-оснастки для СВС-процессов, учитывающих существенную нестационарность и неизотермичность процессов, а также термическую градиентность по толщине стенок пресс-формы [10 – 12].

В статье представлены основные аспекты математического моделирования указанных технологических процессов.

---

\* По материалам доклада на конференции ММТТ-2014.

## Тепловые модели

*Анализ технологических процессов с позиций основных стадий.* Каждый технологический процесс предполагает сумму ряда технологических операций, соответствующих основным стадиям процесса. Такие стадии можно выделить на временных диаграммах процесса. Например, СВС-экструзия порошковых материалов предполагает следующие три главные стадии: горение и задержка, прессование, выдавливание.

Особенностью предлагаемого подхода к моделированию технологических процессов является выделение самостоятельных последовательно протекающих физических стадий, каждая из которых подробно анализируется с учетом их специфических особенностей и задач. Теоретический анализ каждой последующей стадии учитывает результаты анализа предыдущей в виде начальных условий. Преимущество такого подхода осознается и используется в теории процессов переработки полимеров.

Основная задача стадии горения и задержки – добиться получения тугоплавкого материала за счет протекания химической реакции. Однако специфическая особенность процесса на этой стадии – необходимость отвода примесных газов – обуславливает задержку подачи давления. В конечном итоге на первой стадии происходит синтез тугоплавкого соединения из исходных компонент. На стадии прессования происходит уплотнение продуктов экзотермической реакции уменьшением объемов воздушных включений в материале и закрытие макропор. Наличие этой стадии обусловлено свойством сжимаемости порошкового материала.

На стадии выдавливания решаются две важные проблемы: формирование изделия и его охлаждение. Многообразии различных конфигураций изделия обеспечивается формой матрицы, через которую продавливается материал. Таким образом, на третьей стадии осуществляется течение материала, закономерности которого в значительной степени определяются его реологическими свойствами. При отверждении материала охлаждением важно не допустить больших термических напряжений в образце и стенках пресс-формы.

Указанные особенности обуславливают специфику автономного теоретического анализа тепловых режимов на каждой из стадий, которую необходимо учесть при формулировке математических моделей. На стадии горения и задержки важно учитывать наличие подвижной границы – фронта горения, перемещающегося по объему материала. Для стадии прессования характерны изменение высоты образца и зависимость теплофизических параметров материала от его плотности. На стадии выдавливания необходимо учитывать конвективный перенос тепла макроперемещением материала и наличие двух подвижных границ: крышки плунжера пресса и нижней границы выдавливаемого образца.

Отметим, что важным моментом, определяющим возможность теоретического анализа процесса по отдельным стадиям, является наличие разделяющих их условий. При переходе от стадии горения и задержки к стадии прессования это условие определяется временем задержки – интервалом времени между началом подачи теплового импульса и началом подачи давления. Сложнее с условием перехода от стадии прессования к стадии выдавливания. Четко задать это условие не удастся, так как, с одной стороны, на стадии прессования справедливо выдавливание части материала, и с другой стороны, на стадии выдавливания материал доуплотняется. Поэтому можно утверждать о приближенном условии. Основой для расчета времени, разделяющего вторую и третью стадии, является физическое соображение о том, что перед выдавливанием материал должен быть спрессован до определенного значения плотности.

Важно отметить следующее преимущество использованного подхода к анализу результатов по отдельным стадиям: анализ каждой из них имеет и самостоятельное значение. Например, первая стадия соответствует процессу получения

порошковых материалов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1]. Объединение первой и второй стадий соответствует существующей СТИМ-технологии получения изделий (СТИМ – синтетические твердые инструментальные материалы) [1].

*Анализ параметров модели и эффективные характеристики процессов.* Развитие технологического процесса зависит от разнообразных режимных факторов, внешних условий, собственных свойств материала, геометрии пресс-оснастки и ее характеристик. Влияние этих факторов должно быть отражено через параметры модели. Выделим следующие четыре основных группы параметров: технологические, физические свойства образца, характеристики пресс-оснастки, параметры, определяющие обстановку на поверхности взаимодействия образца с окружающей средой (граничные условия). При выборе оптимальных условий проведения процесса необходимо последовательно определить значение каждого параметра из этих четырех групп. Например, для СВС-компактирования к числу технологических параметров следует отнести: давление  $P$  на плунжере пресса, скорость  $U_{\text{п}}$  плунжера пресса, время задержки  $t_3$ , время выдержки  $t_{\text{в}}$  (выдержка материала под давлением для СВС-прессования). Эти параметры довольно просто регулируются в эксперименте. Ряд осложнений, возникающих при экструзии, удается устранить, меняя характеристики пресс-оснастки. Среди этих характеристик выделим следующие: геометрические размеры пресс-формы (высота и толщина стенок, внутренний диаметр пуансона); физические свойства материала, из которого изготовлена пресс-форма; геометрические размеры матрицы (угол конической распушки, диаметр ее отверстия, толщина стенок); физические свойства материала матрицы.

Во время продавливания материала через матрицу он должен обладать способностью к пластическому деформированию. Поведение материала при деформировании определяется комплексом реологических свойств, и, прежде всего, вязкостью и ее зависимостью от скорости сдвига. В рамках принятой в работе тепловой модели, влияние реологических свойств на процесс отражено опосредованно – через эффективную характеристику  $T_{\text{ж}}$  – температуру живучести. При некоторой условности данной характеристики можно считать, что выше этой температуры материал проявляет способность к течению, ниже – затвердевает. Упрощенность такого подхода состоит в том, что рассматривается не зависимость температуры живучести от комплекса реологических свойств, а считается, что  $T_{\text{ж}} = \text{const}$  и определяется из эксперимента. Экспериментальное измерение  $T_{\text{ж}}$  для различных материалов представлено в [2].

Количественное описание процесса горения требует знания кинетических параметров химической реакции. Однако прямое экспериментальное определение этих параметров часто является сложной задачей. Поэтому в тепловой модели приняты эффективные характеристики горения образца: скорость горения  $U_{\text{г}}$  и температура горения  $T_{\text{г}}$ , которые определяются экспериментально в реальных технологических условиях.

Чтобы правильно сформулировать тепловые граничные условия, необходимо учитывать следующую группу факторов: теплоизоляцию образца; наличие направляющих калибров; наличие заглушки в отверстии матрицы; теплоизоляцию стенок матрицы или наличие смазки. Таким образом, перечисленные параметры тепловой модели находятся расчетным способом либо определяются из эксперимента, что позволяет применять модель для изучения различных экспериментальных ситуаций, проводить количественное описание процесса, прямое сопоставление теоретических и экспериментальных данных.

*Формулировка тепловых моделей.* СВС-технология осложняется многими процессами: тепловыделением, гидродинамикой, теплообменом, спеканием и т.д. Важную роль играют реологические факторы, поскольку объектом деформирова-

ния является тугоплавкий сжимаемый материал. Однако на первоначальном этапе при формулировке математических моделей вместо попытки создания «универсальной теории», учитывающей все факторы, влияющие на процесс, целесообразно ограничиться возможно более простой математической схемой, учитывающей лишь отдельные факторы, которые в определенный отрезок времени управляют процессом. В тепловых моделях в качестве основного параметра процесса выделена температура, которая является функцией трех координат и времени  $T = T(r, z, \phi, t)$  ( $r$  – радиальная,  $z$  – осевая,  $\phi$  – угловая координаты). Ведущая роль этого параметра определяется большим характерным температурным интервалом порядка 2000...3000 К.

Исследуемый процесс может быть описан системой дифференциальных уравнений для теплоизолятора

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \nabla^2 T_1 = a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

образца

$$c \left( \frac{\partial(\rho T_2)}{\partial t} + f(\rho, z) \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = \lambda_2(\rho) \nabla^2 T_2, \quad (2)$$

и пресс-формы

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \nabla^2 T_3 = a_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

где  $T_1, T_2, T_3$  – температуры в теплоизоляторе, образце и пресс-форме соответственно, К;  $a$  – температуропроводность теплоизолятора, образца и материала пресс-формы соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

В зависимости от стадии процесса функции  $f(\rho, z), \lambda_2(\rho)$ , входящие в дифференциальные уравнения, имеют следующие значения:

$$f(\rho, z) = \begin{cases} 0 \text{ (I);} \\ \frac{\rho U_{\text{п}} z}{H_0} \text{ (II);} \\ \frac{Q}{\pi R^2(z)} \text{ (III),} \end{cases} \quad \lambda_2(\rho) = \begin{cases} \lambda_0 \text{ (I);} \\ \lambda_0 \left( \frac{\rho_0(1 - U_{\text{п}} t / H_0)}{\rho_0} \right)^k \text{ (II);} \\ \lambda_k \text{ (III),} \end{cases}$$

где I – стадия горения и задержки, II – стадия прессования, III – стадия выдавливания СВС-экструзии;  $H_0$  – начальная высота образца, м;  $\lambda_2, \lambda_0, \lambda_k$  – коэффициент теплопроводности образца, изменяющийся во время процесса, его начальное и конечное значения соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\rho_0$  – начальная плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $R(z)$  – внутренний радиус конической матрицы, м;  $Q$  – расход материала,  $\text{кг}/\text{с}$ .

Для решения конкретных тепловых задач следует определить геометрические границы тела, выбрать граничные условия и точно охарактеризовать физические свойства материала. Все вышеизложенные соображения учитывались при формулировке тепловых моделей СВС-процессов.

В результате численного решения задачи находилось температурное поле в образце, теплоизоляторе, пресс-форме, выдавливаемой части материала и прогнозировалась длина изделия. Когда часть материала, находящаяся в профилирующей матрице и расположенная непосредственно над ее отверстием, теряла «живучесть», то есть способность к пластическому деформированию, и закупоривала выходное отверстие, выдавливание прекращалось. Полученная длина – ордината нижней границы образца – и являлась искомой длиной изделия.

*Сопоставление модели и эксперимента.* Основные результаты математического моделирования получены на основе численных расчетов системы двумерных уравнений теплопроводности в сложных многослойных геометрических областях с подвижными границами.

Важным моментом математического моделирования является сопоставление модели и эксперимента. Такое сопоставление проводилось по различным характеристикам: на стадии горения и выдержки и прессования (СВС-прессование, СВС-экструзия) сопоставление проводилось по температурам в различных точках образца, теплоизолятора и пресс-оснастки, на стадии выдавливания (для СВС-экструзии) – по длине выдавленной части образца (рис. 1).

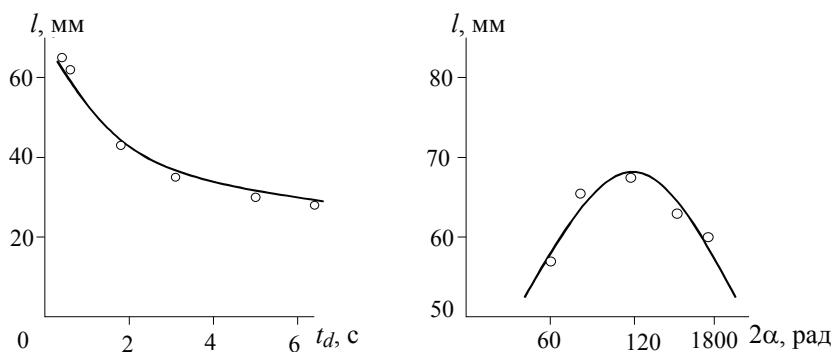
Предпринятое сопоставление проводилось по характеристикам, имеющим комплексный характер, и хорошее согласие теории и эксперимента послужило основанием для многовариантных численных исследований тепловых режимов и подтверждает вывод о ведущей роли теплопроводности в СВС-процессах.

*Вычислительный эксперимент и оптимизация СВС-процессов.* Для определения эффективных способов управления процессом проведен анализ температурных полей, возникающих на различных стадиях процесса в образце и пресс-форме. При этом важно исследовать ряд практических проблем:

- влияние основных параметров процесса на тепловой режим;
- сопоставление в тепловом отношении различных схем эксперимента (одностороннее / двустороннее прессование, поджиг сверху или снизу, наличие или отсутствие теплоизоляции образца, роль направляющих калибров в экструзии, применение смазок и т.п.);
- разрешение проблемных ситуаций, связанных с частичным или полным отверждением материала, высокой градиентностью по температуре, влияющей на качество изделия.

В работах [3 – 9] подробно исследовалась роль основных параметров процесса, таких как давление на плунжере пресса, время задержки и выдержки, геометрических размеров образца и профилирующей матрицы, степени деформации образца и т.д., зависимости характеристик процесса от некоторых параметров немонокотными, что позволяло выделить оптимальный в тепловом отношении диапазон изменения этих параметров.

Результаты математического моделирования оказались весьма полезными для решения проблемы воспроизводимости технологического процесса, которая является центральной для каждого метода. Так, например, оказалось, что воспроизводимость процесса получения нагревательных элементов на основе дисилицида молибдена методом СВС-экструзии гораздо ниже, чем воспроизводимость



**Рис. 1.** Зависимость длины  $l$  выдавленного стержня от времени задержки  $t_d$  (а) и угла конической распушки матрицы  $2\alpha$  (б) (линия – теоретический расчет; точки – эксперимент)

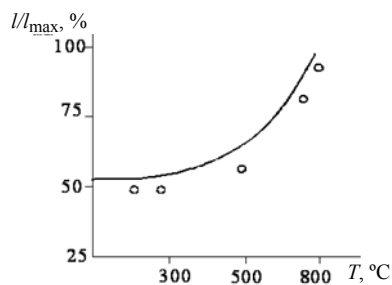
процесса получения электродных элементов на основе карбида титана этим же методом [8]. При анализе динамики температурных изменений выявлена причина этого экспериментального факта. Оказалось, что температурный диапазон живучести материала (интервал переработки), определяемый как разность между температурой в конце стадии прессования и температурой живучести для нагревательных материалов составляет 200...300 °С, а для карбидтитановых твердых сплавов этот диапазон равен 900 °С. Таким образом, формование материала при получении нагревательных элементов ведется вблизи критических условий, когда материал теряет способность к пластическому деформированию. Выяснилось, что весьма существенным фактором является теплоотвод в отверстия матрицы. На рассматриваемой границе теплообмен происходит за счет естественной конвекции воздуха от нагретого образца и излучения энергии разогретым до температуры горения образцом. Приближение условий теплообмена на этой границе к адиабатическим резко снижает темп остывания образца.

Расчеты показали, что подогрев калибра и стенок матрицы в пределах допустимого интервала температур увеличивает длину изделия в 1,3 раза при нагреве до 300 °С (рис. 2), в 1,7 раза при нагреве до 500 °С и в 2,3 раза при подогреве до 800 °С. Проведенные эксперименты показали, что при нагреве до 250...300 °С происходит увеличение полноты выдавливания в 1,2 раза, повышается плотность стержней от 4,7...4,8 г/см до 5,1...5,3 г/см, частично уменьшается трещиноватость и чешуйчатость, полностью исчезает закупорка матрицы [8].

### Неизотермические реодинамические модели СВС-компактирования

В тепловых моделях роль реологического фактора учитывалась через эффективную характеристику – температуру живучести. Эти модели не позволяют рассчитывать процессы высокотемпературного деформирования и уплотнения, основными параметрами которых являются макроскопическая плотность, скорость и напряжения в материале. В процессе синтеза материала, его уплотнения и остывания, резко меняется его способность к макроскопическому течению, которая определяется реологическими свойствами горячей пористой массы. Однако переведенный в высокотемпературное состояние пористый материал является в реологическом отношении объектом малоизученным. Его специфика заключается в наличии большого объема пор (до 50 %) и изменении пористости в процессе уплотнения, а также образовании в области предплавления температур непрерывного каркаса из частиц тугоплавкой составляющей, который оказывает сопротивление деформированию. Для качественного и количественного анализа неизотермического течения сжимаемых материалов в различных зонах оборудования СВС-процессов разработаны неизотермические реодинамические модели [5–7], которые являются усложнением ранее разработанных тепловых моделей.

Основной задачей теоретического рассмотрения в рамках реодинамических моделей является анализ плотности, температуры и напряженно-деформированного состояния материала в процессе его прессования и экструзии в зависимости от давления, а также от начального распределения температуры и плотности по объему образца. Важный момент такого описания – выбор реологических уравнений. В дальнейшем предполагается, что уплотнение материала происходит по механизму вязкого течения массы в поры (согласно теории Я. И. Френкеля [13]).



**Рис. 2. Зависимость относительной длины  $l/l_{\max}$ , %, выдавленной части от температуры  $T$  подогрева матрицы и калибра** (линия – теоретический расчет, точки – эксперимент)

Реологические свойства такой среды, то есть способность к деформированию и течению, определяются свойствами твердой фазы, наличием и степенью пористости.

### Заключение

Подчеркнем некоторые различия между общим теоретическим исследованием и математическим моделированием явлений и процессов. Цель теории заключается в получении общих сведений об изучаемом объекте, здесь не так существенны конкретные данные и условия протекания процессов, которые часто в математическом описании могут задаваться в самом общем виде. Для математического моделирования весьма существенной стороной является использование конкретных данных в реальных технологических условиях.

Математическое моделирование конкретных технологических процессов должно включать следующие этапы:

– формулировку математической схемы, соответствующей реальным условиям протекания производства (оборудование, материалы, процесс); важную часть этого этапа составляет физический анализ процесса и выбор основных параметров модели;

– расчет конкретных данных (физических и химических свойств материала – технологического объекта) и реальных условий протекания процесса (граничные и начальные условия), конкретные данные о технологическом режиме и оборудовании (технологические и геометрические параметры);

– сопоставление модели и эксперимента; важно выявить рамки применимости модели и ее возможности для конкретных практических рекомендаций и прогноза возникновения проблемных ситуаций в технологической практике;

– использование результатов математического моделирования в инженерной практике для получения конкретных изделий.

С этих позиций и следует рассматривать полученные результаты в области математического моделирования различных СВС-технологий.

### Список литературы

1. А. с. 736541 СССР, МКИ<sup>3</sup> С0 1В 35/00, С0 1В 31/30, С0 1В 21.06. Способ получения тугоплавких неорганических соединений / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. И. Ратников [и др.] (СССР).
2. Технологические основы СВС-экструзии / В. В. Подлесов [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 5. – С. 525 – 537.
3. Стельмах, Л. С. Математическое моделирование СВС-экструзии. Ч. 1. Тепловые модели / Л. С. Стельмах, А. М. Столин, А. Г. Мержанов // Инженер.-физ. журн. – 1993. – Т. 65, № 1. – С. 83 – 89.
4. Стельмах, Л. С. Математическое моделирование тепловых режимов силового СВС-компактирования / Л. С. Стельмах, Н. Н. Жилиева, А. М. Столин // Инженер.-физ. журн. – 1992. – Т. 63, № 5. – С. 623 – 629.
5. Стельмах, Л. С. Математическое моделирование СВС-экструзии. Ч. 2. Реодинамические модели / Л. С. Стельмах, А. М. Столин // Инженер.-физ. журн. – 1993. – Т. 65, № 1. – С. 90 – 94.
6. The Phenomenological Theory of High-Temperature Deformation of Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS) Products / A. M. Stolin [et al.] // J. of Materials Synthesis and Processing. – 1995. – Vol. 3, No. 1. – P. 19 – 23.
7. Stelmakh, L. S. Macrorheological Theory of High-Temperature Deformation of Powder Materials under SHS-Compacting / L. S. Stelmakh, A. M. Stolin // J. of the European Ceramic Society. – 1997. – No. 17. – P. 453 – 456.
8. Исследование технологических режимов экструзии высокотемпературных нагревательных элементов на основе MoSi<sub>2</sub> / С. В. Веденеев [и др.] // Силициды

и их применение в технике : сб. науч. тр. / под ред. Л. А. Двориной. – Киев : Ин-т проблем материаловедения, 1990. – С. 59 – 63.

9. Разработка моделей и комплекса программ для компьютеризации технологии силового СВС-компактирования / Л. С. Стельмах [и др.]. – Ереван : ИЖР АН Армении, 1992. – 13 с.

10. Стельмах, Л. С. Неизотермический метод расчета пресс-оснастки установки компактирования горячих продуктов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Л. С. Стельмах, А. М. Столин, Д. С. Дворецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 1 – 9.

11. Новый подход к получению тугоплавких неорганических соединений на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Д. С. Дворецкий [и др.] // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2012. – Спец. вып. (39). – С. 166 – 178.

12. Стельмах, Л. С. Термоупругие напряжения в конечном цилиндре в случае двумерного поля температур / Л. С. Стельмах, А. М. Столин // Инженер.-физ. журн. – 1989. – Т. 56, № 4. – С. 695 – 696. – Деп. в ВИНТИ 14.10.88, № 7437-В 88.

13. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Л. : Наука, Ленингр. отд., 1975. – 592 с.

---

## General Principles of Mathematical Modeling of SHS Technology

A. M. Stolin, L. S. Stelmakh

*Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science (ISMAN),  
Chernogolovka; stelm@ism.ac.ru*

**Key words and phrases:** combustion; deformation; mathematical modeling; porous material; rheodynamic model; SHS-compacting; SHS-extrusion; thermal model; viscous compressible material.

**Abstract:** The authors proposed the basic principles of mathematical modeling of processes of SHS-compaction when producing finished goods. The general approaches, ideas and the methods of mathematical modeling, which are equally useful both to the SHS technology and for other processes of chemical technology, were described. The examples of successful use of mathematical modeling for specific practical recommendations and forecast of the occurrence of problem situations in the technological practice of SHS-compacting were given.

### References

1. Merzhanov A.G., Borovinskaya I.P., Ratnikov V.I. et al. *Sposob polucheniya tugoplavkikh neorganicheskikh soedinenii* (A method of producing refractory inorganic compounds), SSSR, Certificate of authorship 736541 МКІ<sup>3</sup> SO1V 35/00, SO1V 31/30, SO1V 21.06.

2. Podlesov V.V., Radugin A.V., Stolin A.M., Merzhanov A.G. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, vol. 63, no. 5, pp. 525-537.

3. Stel'makh L.S., Stolin A.M., Merzhanov A.G. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1993, vol. 65, no. 1, pp. 83-89.

4. Stel'makh L.S., Zhilyaeva N.N., Stolin A.M. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, vol. 63, no. 5, pp. 623-629.

5. Stel'makh L.S., Stolin A.M. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1993, vol. 65, no. 1, pp. 90-94.

6. Stolin A.M., Stelmakh L.S., Zhilyaeva N.N., Khusid B.M. *J. of Materials Synthesis and Processing*, 1995, vol. 3, no. 1, pp. 19-23.



7. Stelmakh L.S., Stolin A.M. *J. of the European ceramic society*, 1997, no. 17, p. 453-456.

8. Vedenev S.V., Zhilyaeva N.N., Stel'makh L.S., Stolin A.M., in Dvorina L.A. (Ed.) *Silitsidy i ikh primenenie v tekhnike* (Silicides and their applications in engineering), Collection of scientific papers, Kiev: Institut problem materialovedeniya, 1990, pp. 59-63.

9. Stel'makh L.S., Zhilyaeva N.N., Sarkisyan A.R., Kharatyan S.P. Stolin A.M., Merzhanov A.G. *Razrabotka modelei i kompleksa programm dlya komp'yuterizatsii tekhnologii silovogo SVS-komlaktirovaniya* (Development of models and complex programs to computerize technology of SHS komlaktirovaniya), Erevan: IZhR AN Armenii, 1992, 13 p.

10. Stelmakh L.S., Stolin A.M., Dvoretiskii D.S. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 192-200.

11. Dvoretiskii D.S., Dvoretiskii S.I., Polyakov B.B., Stel'makh L.S., Stolin A.M. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet imeni V. I. Vernadskogo*, 2012, special issue (39), pp. 166-178.

12. Stelmakh L.S., Stolin A.M. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1989, vol. 56, no. 4, pp. 695-696, Article deposited at the Russian Institute of Scientific and Technical Information (VINITI), 14 October 1988, no. 7437-B 88.

13. Frenkel' Ya.I. *Kineticheskaya teoriya zhidkosti* (Kinetic Theory of Liquids), Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1975, 592 p.

---

## Grundprinzipien der mathematischen Modellierung der SHS-Technologien

**Zusammenfassung:** Es sind die Hauptprinzipien der mathematischen Modellierung der Prozesse der SHS-Kompaktierung beim Erhalten der Fertigwaren angeboten. Es ist das allgemeine Herangehen, die Ideen und die Aufnahmen der mathematischen Modellierung, die für die Technologie von SHS und für anderen Prozesse der chemischen Technologie notwendig sind, dargelegt. Es sind die Beispiele der erfolgreichen Nutzung der mathematischen Modellierung für die konkreten praktischen Empfehlungen und die Prognose des Entstehens der Problemsituationen in der technologischen Praxis von der SHS-Kompaktierung angeführt.

---

## Principes communs du modélage mathématique des technologies SHS

**Résumé:** Sont proposés les principes essentiels du modélage mathématique des processus de la compaction SHS lors de l'obtention des articles finis. Sont exposées les approches générales, les idées et les moyens du modélage mathématique nécessaires pour les technologies SHS et pour d'autres processus de la technologie chimique. Sont cités les exemples de l'emploi réussi du modélage mathématique pour les concrètes recommandations pratiques et pour la prévision des situations problématiques dans la pratique technologique de la compaction SHS.

---

**Авторы:** *Столин Александр Моисеевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пластического деформирования материалов; *Стельмах Любовь Семеновна* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Пластические деформации неорганических материалов», ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН)», г. Черноголовка.

**Рецензент:** *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».