

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ МАССЫ В ФОРМУЮЩЕМ ЗВЕНЕ ШНЕКОВОГО ПРЕССА

Галицков С.Я., Назаров М.А.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»,
Самара, e-mail: maes@samgasu.ru

Выполнено моделирование процесса формования керамических камней как объекта управления с распределенными параметрами, в котором впервые в качестве выходной координаты выбрана скорость сдвиговых деформаций керамической массы в рабочем объеме формующего звена вакуумного шнекового пресса. Управляющие воздействия – угловая скорость шнека и влажность керамической массы. На основании принятых допущений показана целесообразность описания динамики процесса уравнением Навье–Стокса и уравнением неразрывности, для которых из анализа технологии процесса выбраны и обоснованы крайние условия. Разработанная математическая модель положена в основу вычислительной, созданной в программной среде SolidWorks. Исследования на вычислительной модели процесса формования полнотелых кирпичей 250×120×65 ГОСТ 530-2007 позволили оценить адекватность математической модели и выявить основные зависимости влияния управляющих и возмущающих воздействий на характеристики поля скоростей сдвиговых деформаций.

Ключевые слова: формование керамической массы, объект управления, скорость сдвиговых деформаций, математическое моделирование

SIMULATION OF SHEAR RATES FIELD OF THE CERAMIC PASTE IN AUGER PRESS SHAPING ELEMENT

Galitskov S.Y., Nazarov M.A.

Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Samara, e-mail: maes@samgasu.ru

Simulation of ceramic stones shaping process as an object of control with distributed parameters, for the first time is selected ceramic paste shear rate in a working volume of de-airing auger press shaping element as the output signal. Angular velocity of the auger and moisture of the ceramic raw material are taken as control actions. Assumptions made demonstrate the feasibility of using the Navier-Stokes equation and equation of continuity to describe the process dynamics. Boundary conditions for these equations have been chosen and justified by the analysis of process technology. A mathematical model is the basis for a computational model one created in the software environment SolidWorks. Research on computational model of solid brick 250×120×65 GOST 530-2007 shaping process made of possible to evaluate the adequacy of the mathematical model and to identify the main dependencies impact of control and disturbing actions on the shear rate field characteristics.

Keywords: shaping ceramic paste, an object of control, shear rate, mathematical modeling

Постановка задачи. Допущения. Пластическое формование керамической массы в вакуумных шнековых прессах [7] является основным технологическим процессом в производстве керамических камней, так как дефекты, приобретенные на данном этапе, не могут быть исправлены на последующих стадиях изготовления кирпичей. Адекватное управление процессом требует знания математической модели «течения» [7] керамической массы в формующем звене. При разработке математической модели исследуемого технологического процесса введен ряд упрощений и допущений.

1. Считаем, что предварительная обработка глины (до поступления в формующее звено) обеспечивает удаление из нее пузырьков воздуха, поэтому пренебрегаем сжимаемостью керамической массы.

2. Принимаем, что для производства керамических камней используется однородное сырье, поэтому плотность глинистых частиц остается неизменной по всему объему пресса и формующего звена.

3. Допускаем, что применяемый для увлажнения пар и/или вода имеют постоянную температуру, а поэтому формование керамических камней в прессе представляет собой изотермический процесс.

Математическая модель «течения» керамической массы в формующем звене

Вводимые в рассмотрение упрощения и допущения позволяют рассматривать формование керамических камней в формующем звене, выполненном в виде воронки с прямоугольным выходным сечением, как изотермический процесс «течения» не-ньютоновской жидкости [7] с неизменными физико-химическими свойствами под действием усилия, создаваемого шнеком. Поэтому для описания технологического процесса формования как объекта управления (в котором в качестве выходной координаты принимаем на основании работы [1] скорость сдвиговых деформаций в рабочем объеме формующего звена, управляющими воздействиями являются угловая скорость

шнека и влажность сырца, основное возмущение – изменение физико-химических свойств керамической массы) используем систему дифференциальных уравнений На-

вье–Стокса, которая описывает динамику вязкой несжимаемой жидкости в изотермических условиях, и уравнение неразрывности потока керамической массы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial(v_x \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z \cdot v_x)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial x} \right) &= F_x; \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial(v_x \cdot v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z \cdot v_y)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) &= F_y; \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial(v_x \cdot v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z \cdot v_z)}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial P}{\partial z} \right) &= F_z; \\ \frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} + \frac{dv_z}{dz} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v_x, v_y, v_z – проекции вектора скорости на оси x, y, z ; $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ – касательные напряжения; P – давление керамической массы в рассматриваемой точке; ρ – плотность керамической массы; F_x, F_y, F_z – проекции внешней силы, отнесенной к единице массы; t – время.

Тензор вязких сдвиговых напряжений [2, 6, 7, 10]:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu(\dot{\gamma}) \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} &= \mu(\dot{\gamma}) \cdot \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right); \\ \tau_{zx} &= \mu(\dot{\gamma}) \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвиговых деформаций,

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{2 \cdot [(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2]}{3}} + \dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2;$$

здесь $\dot{\gamma}_{xy}, \dot{\gamma}_{yz}, \dot{\gamma}_{zx}$ – компоненты этой скорости,

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x};$$

$$\dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y};$$

$$\dot{\gamma}_{zx} = \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}.$$

$\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z$ – скорости линейных деформаций, с учетом несжимаемости керамической массы

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2}$$

$\mu(\dot{\gamma})$ – эффективная вязкость, $\mu(\dot{\gamma}) = \mu_1 \cdot (\dot{\gamma})^{w-1}$, здесь μ_1 – коэффициент консистенции, $\mu_1 = f(w)$, w и ψ – влажность и индекс течения керамической массы.

Система дифференциальных уравнений (1) дополнена граничными и начальными условиями. Граничные условия (ГУ) формулирующего звена сформулированы на осно-

вании общепринятых допущений, характерных для описания процесса движения керамической массы и практики эксплуатации вакуумных шнековых прессов:

ГУ1 – скорости частиц формуемой массы на стенках

$$v_{\text{ст}} = 0; \quad (2)$$

ГУ2 – функция распределения скоростей керамической массы на входном торце получена по результатам моделирования скорости течения неньютоновской жидкости через кольцевое сечение (которым представляется пространство, образованное корпусом пресса и ступицей шнекового вала), выполненное с использованием материалов, представленных в работах [3, 5]:

$$v_x(r, \omega_a)|_{x=0} = K_v(r) \cdot \frac{Q(\omega_a)}{\pi \cdot R^2}, \quad (3)$$

где r – текущее значения радиуса входного цилиндра воронки, $r \in 0, \dots, R$, R – радиус цилиндра, ω_a – угловая скорость шнека, $Q(\omega_a)$ – расход керамической массы; $K_v(r)$ – коэффициент, зависящий от текущего значения радиуса;

ГУЗ – давление керамической массы на выходном торце (при $x = L$, L – длина формирующего звена)

$$P|_{x=L} = 101325 \text{ Па} \quad (4)$$

принято на основании результатов исследований [9, 11] шнекового пресса.

Под начальными условиями понимается режим работы пресса, когда формирующее звено заполнено керамической массой, а скорость шнека $\omega_a = 0$. В этом случае:

$$P|_{t=0} = 101325 \text{ Па}, \quad (5)$$

$$v_x|_{t=0} = v_y|_{t=0} = v_z|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

Пример моделирования поля скоростей сдвиговых деформаций. На примере шнекового вакуум-пресса *Händle PZG 60b/50* [6], оборудованного формирующим звеном для выпуска полнотелых кирпичей $250 \times 120 \times 65$ ГОСТ 530-2007, в программной среде *Solid Works* на основании уравнений (1) с учетом краевых условий (2)–(6) создана вычислительная модель поля скоростей сдвиговых деформаций керамической массы в формирующем звене.

Модель представляет собой состояние многомерного технологического объекта с распределенными параметрами. Здесь в качестве выходной координаты выбрана скорость сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ в рабочем объеме формирующего звена и линейная скорость v_x на выходном торце. Величина $\dot{\gamma}$ определяется двумя управляющими воздействиями – угловой скоростью шнека ω_a и влажностью w . Основным возмущением является индекс течения ψ .

Методика постановки вычислительных экспериментов заключалась в оценке характеристик поля скоростей сдвиговых деформаций в квазистатическом режиме при постоянных дискретных значениях влажности w_i керамической массы, которым соответствует коэффициент консистенции

$$\mu_{1i} = \mu_{10} + i \cdot \Delta\mu_1; i = 0, 1, \dots, 4;$$

$$\mu_{10} = 10000 \text{ Па} \cdot \text{с}; \Delta\mu_1 = 30000 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

дискретных постоянных значениях индекса течения керамической массы

$$\psi_j = \psi_0 + j \cdot \Delta\psi; j = 0, 1, 2;$$

$$\psi_0 = 0,1; \Delta\psi = 0,1$$

и скачкообразном изменении скорости шнека

$$\omega_{ak}(t) = \omega_{ak} \cdot l(t),$$

где

$$\omega_{ak} = \omega_{a0} + k \cdot \Delta\omega_a; k = 0, 1, \dots, 5;$$

$$\omega_{a0} = 0,5 \text{ рад/с}; \Delta\omega_a = 0,5 \text{ рад/с}.$$

Материалы расчета на вычислительной модели содержат в себе и переходную составляющую, и установившийся режим. В данной статье приводятся результаты исследования установившегося режима.

Из анализа материалов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчета координаты v_x были использованы для их сравнения с экспериментальными значениями скорости движения керамической массы на выходе формирующего звена, полученными в работе [4]. Сравнение распределения скорости v_x на выходном торце формирующего звена, полученного на модели (кривая 1, рис. 1), с экспериментально полученным в [4] распределением скорости на подобном прессе (кривая 2) показало, что отклонение не превышает 5%. Здесь по оси абсцисс отложено относительное значение ширины выходного сечения, по оси ординат – относительное значение скорости, за базовое значение скорости принята ее максимальная величина. Поэтому считаем, что разработанная математическая модель адекватно описывает исследуемый технологический процесс как объект управления.

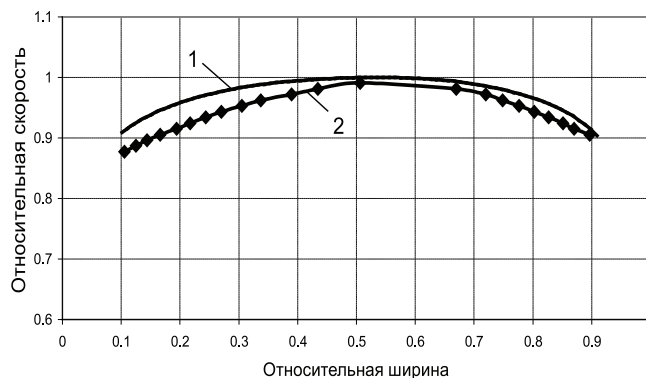


Рис. 1. Оценка адекватности модели:

1 – скорость v_x на выходном торце формирующего звена, полученная на модели;
2 – экспериментально полученная скорость v_x

2. Поле скоростей сдвиговых деформаций керамической массы в формирующем звене вакуумного шнекового пресса в ис-

следуемом диапазоне изменения влажности практически не зависит от w , но существенно зависит от индекса течения ψ (рис. 2).

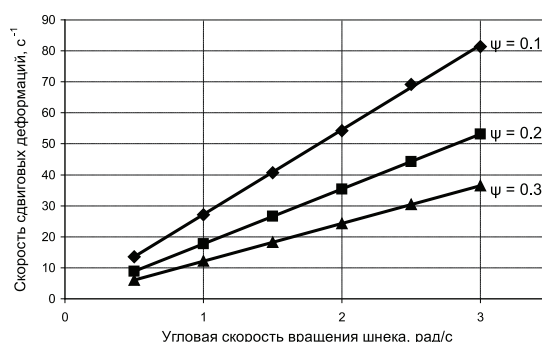


Рис. 2. Зависимость скорости сдвиговых деформаций от частоты вращения шнека (при различных индексах течения керамической массы)

3. Анализ поля распределения скорости сдвиговых деформаций по объему формирующего звена показал, что максимальная ее величина $\dot{\gamma}_{\max}$ наблюдается на горизонтальных стенках выходного сечения.

4. Установлена линейная зависимость (рис. 2) максимальной скорости сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}_{\max}$ от скорости вращения ω_a шнека.

Список литературы

1. Барабанщиков Ю.Г. Влияние скорости формования на прочность строительных изделий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2006. – № 6-1. – С. 170–175.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Каплун Я.Б., Ким В.С. Формующее оборудование экструдеров. – М.: Машиностроение, 1969. – 160 с.
4. Королёв К.М. Исследование ленточных шнековых прессов пластического формования керамических изделий. – М.: Центральный институт научно-технической информации машиностроения, 1960 – 84 с.
5. Масляницын А.П., Назаров М.А. Моделирование процесса пластического формования керамических камней в среде Matlab Simulink // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании. Труды VIII Всероссийской межвузовской научно-практической конференции. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2009 – С. 134–137.
6. Ничипоренко С.П. К теории обработки пластичных керамических масс. – Киев: Издательство академии наук Украинской ССР, 1954. – 40 с.
7. Силенок С.Г., Борщевский А.А., Горбовец М.Н. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: учебник для студентов вузов – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
8. Современное состояние глиноперерабатывающего формующего оборудования и транспортно-укладочного оборудования для производства керамических стеновых материалов / Министерство промышленности строительных материалов, Всесоюзный научно-исследовательский институт научно-технической информации и экономики промышленности строительных материалов. – М.: ВНИИЭСМ, 1988. – 79 с.
9. Толкачев В.Я. Технология качественной экструзии изделий из глины. – Красноярск: Изд. «Компьютерные технологии», 2009. – 220 с.
10. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собакин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.
11. Frank Handle (Ed.). Extrusion in Ceramics. – Berlin: Publ. «Springer», 2007. – 470 p.

References

1. Barabanshikov Yu.G. Vliyaniye skorosti formovaniya na prochnost stroitelnykh izdeliy // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU, 2006, no. 6-1, pp. 170–175.
2. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov: uchebnoye posobie dlya stroitelnykh vuzov [Rheological funda-

mentals of soil mechanics: a manual for building university], Moscow, Vysshaya shkola, 1978. 447 p.

3. Kaplun Ya.B., Kim V.S. Formuyuschee oborudovanie ekstrudirov [Form of equipment extruders], Moscow, Mashinostroenie, 1969. 160 p.

4. Korolev K.M. Issledovanie lentochnykh shnekovykh pressov plasticheskogo formovaniya keramicheskikh izdeliy [Analysis auger presses of plastic shaping ceramic products], Moscow, Centralnyy institut nauchno-tehnicheskoy informatsii mashinostroeniya, 1960. 84 p.

5. Maslyanitsyn A.P., Nazarov M.A. Modelirovaniye procesa plasticheskogo formovaniya keramicheskikh kamney v srede Matlab Simulink // Kompyuternye tekhnologii v nauke, praktike i obrazovanii. Trudy VIII Vserossiyskoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Computer technology in the science, practice and education. Proceedings of the VIII All-Russian Inter-University Scientific Conference), Samara, 2009, pp. 134–137.

6. Nychiporenko S.P. K teorii obrabotki plastichnykh keramicheskikh mass [To the theory of handling of plastic ceramic raw materials], Kiev, Publisher Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1954. 40 p.

7. Silenok S.G., Borschevskiy A.A., Gorbovec M.N. Mekhanicheskoe oborudovanie pred-priyatiy stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruktsiy: uchebnik dlya studentov vuzov [The mechanical equipment of building materials, products and structures: a textbook for high schools students], Moscow, Mashinostroenie, 1990. 416 p.

8. Sovremennoye sostoyaniye glinopererabatyvayushchego formuyushchego oborudovaniya i transportno-ukladochного oborudovaniya dlya proizvodstva keramicheskikh stenovyykh materialov [Current status of shaping and handling clay equipment and transport and paving equipment for the production of ceramic wall materials] / Ministerstvo promyshlennosti stroitelnykh materialov, Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut nauchno-tehnicheskoy informatsii i ekonomiki promyshlennosti stroitelnykh materialov, Moscow, VNIIESM, 1988. 79 p.

9. Tolkahev V.Ya. Tekhnologiya kachestvennoy ekstruzii izdeliy iz glin [Technology of qualitative clay products extrusion], Krasnoyarsk, Publ. «Kompyuternye tekhnologii», 2009. 220 p.

10. SolidWorks. Kompyuternoe modelirovaniye v inzhenernoy praktike [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice] / Alyamovskiy A.A., Sobachkin A.A., Odincov E.V., Haritonovich A.I., Ponomarev N.B, St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2006. 800 p.

11. Frank Handle (Ed.). Extrusion in Ceramics, Berlin, Publ. «Springer», 2007. 470 p.

Рецензенты:

Лысов В.Е., д.т.н., профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета, г. Самара;

Данилушкин А.И., д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета, г. Самара.

Работа поступила в редакцию 17.05.2013.