

ВИЗНАЧЕННЯ ВХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ГЛИНИСТОЇ МАСИ

В статті розглядається проблема визначення реологічних характеристик керамічної маси, які є необхідними та служать вхідними даними для розрахункової моделі в модулі гідрогазодинамічного аналізу SolidWorks Flow Simulation. Для цього авторами запропонована схема моделювання течії керамічної маси шляхом протягування сталльної пластини, вздовж стінки свіжосформованого керамічного виробу, при якій забезпечується стаціонарний рух. За результатами проведених експериментів побудована реологічна крива. Використовуючи середовище Excel, проведена апроксимація експериментальної кривої рівняннями Бінгама, Кессона, Гершеля-Балклі та виконано їх порівняння. Зроблений висновок на основі якого вибрана реологічна модель, яка найадекватніше описує потік глинистої маси.

Ключові слова: фільєра, глинистий потік, реологічні коефіцієнти, реологія, неньютонівська рідина.

В статье рассматривается проблема определения реологических характеристик керамической массы, которые необходимы и служат входными данными для расчетной модели в модуле гидрогазодинамического анализа SolidWorks Flow Simulation. Для этого авторами предложена схема моделирования течения керамической массы путем протягивания стальной пластины, вдоль стенки свежесформированного керамического изделия, при которой обеспечивается стационарное движение. По результатам проведенных экспериментов построена реологическая кривая. Используя среду Excel, проведена аппроксимация экспериментальной кривой уравнениями Бингама, Кессона, Гершеля-Балкли и выполнено их сравнение. Сделан вывод на основе которого выбрана реологическая модель, которая адекватно описывает поток глинистой массы.

Ключевые слова: фильера, глинистый поток, реологические коэффициенты, реология, неньютоновская жидкость.

The paper addresses the problem of determining the rheological characteristics of ceramic masses that are necessary and serve as input for the calculation model module hydro-gas-dynamic analysis of SolidWorks Flow Simulation. To this end the authors proposed a scheme of modeling ceramic mass flow by dragging steel plates along the wall just formed pottery, which provides steady movement. Rheological curve based on the results of the experiments. Using Excel environment approximation of the experimental curve equations Bingham, Caisson, Herschel-Balkli conducted and their comparison completed. This conclusion is based on the selected rheological model that most adequately describes the flow of the clay mass.

Keywords: die, clay stream, flow rates, rheological coefficients, non-Newtonian fluid.

Одним із перспективних напрямків підвищення ефективності виробництва керамічних виробів є використання технологічного інструменту (фільєр, кернів та кернових вставок) з робочими поверхнями, форма яких є адаптованою до конкретної сировини. Проектування такого інструменту можливе тільки з використанням тривимірного моделювання процесу протікання керамічної маси через інструмент. Таку можливість дає використання САПР SolidWorks, зокрема модуля гідрогазодинамічного аналізу SolidWorks Flow Simulation. Останній дозволяє моделювати потік глинистої маси та дослідити її вплив на формоутворюючі поверхні інструменту, що дає можливість знайти залежність між формою робочої поверхні та її зносостійкістю.

Проте виникає проблема адекватного опису розрахункової моделі, яка ускладнюється тим фактом, що глиниста маса є неньютонівською рідиною з певним напруженням зсуву [1]. На кожному виробництві використовується шихта, яка є сумішшю різних глин з різними властивостями, тому її реологічні властивості є індивідуальними. Як наслідок, реологічна модель опису шихти також буде індивідуальною. Вибору останньої та визначенню її змісту і присвячена дана стаття.

Глиниста маса є матеріалом, який не тече при низьких напруженнях зсуву. Проте при високих напруженнях зсуву вона тече і транспортується, як будь-яка інша рідина. Для її опису в літературі пропонується велика кількість реологічних рівнянь. Проте найбільш популярними і простими [1, 5, 7] є рівняння:

- Бінгама: $\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$;
- Кессона: $\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\eta_p \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$;

- Гершеля-Балклі: $\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$.

В них, τ_0 - граничне напруження зсуву, η_p - «пластична в'язкість», K і n - експериментально визначені параметри.

Комп'ютерні моделі на базі цих рівнянь реалізовані в модулі SolidWorks Flow Simulation, проте проблемою залишається визначення констант, що входять в реологічне рівняння (τ_0 , η_p , K , n). Для керамічної маси, що є неньютонівською рідиною практично єдиним методом їх визначення є експериментальний.

При його реалізації можливі два підходи – абсолютний і відносний [1]. Обидва широко використовуються в сучасній практиці, проте більш точним і зручним є абсолютний підхід.

Абсолютні методи вимірювання в'язкості ґрунтуються на прямому використанні рівняння $\tau = \eta \dot{\gamma}$. В цьому випадку швидкість зсуву і напруження визначаються незалежно, і в'язкість визначається як відношення цих величин. Як швидкість зсуву так і напруження знаходяться для деякої точки простору, де тече рідина. Найчастіше в експериментальній практиці роль кінематичного параметру відіграє лінійна або кутова швидкість, а динамічного – прикладений тиск або крутний момент.

Таким чином основною задачею теорії абсолютного методу вимірювання в'язкості є визначення співвідношення між параметрами величин для певної реометрії течії, що визначається конструкцією вимірювального пристрою:

- силою (моментом сил) – напруженням;
- швидкістю течії – швидкістю деформації.

В якості пристрою для матеріалів з високими напруженнями зсуву доцільно використовувати зсувні пластометри [1]. Прилади такого типу відображають ідеальну модель зсувної течії (рис. 1).

Ця схема вимірювань найбільш чітко визначає в'язкість. Проте на практиці реалізація цієї схеми пов'язана з певними методичними труднощами.

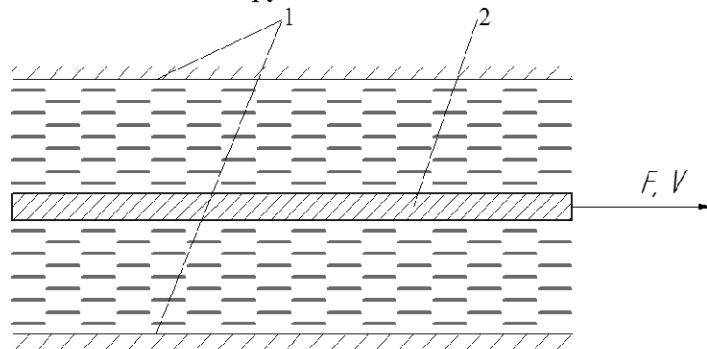


Рис. 1. Ідеальна модель зсувної течії: 1 – нерухомі стінки; 2 – рухома пластина

При площі досліджуваного зразка, розміщеного між пластинами S і відстанню між пластинами h , швидкість зсуву обчислюється за виміряною швидкістю V переміщення однієї з пластин відносно іншої як $\dot{\gamma} = V/h$. Напруження зсуву знаходиться визначенням зусилля F , яке необхідно створити для того, щоб здійснити рух пластини з необхідною швидкістю. Це напруження рівне $\tau = F/S$. Звідси по загальній формулі, як і у всіх інших випадках, знаходиться ефективна в'язкість як відношення величин $\eta = \tau/\dot{\gamma}$.

Експерименти, які виконуються за допомогою зсувних пластометрів реалізуються в різних режимах: або $F = const$, або $V = const$. Найбільш часто ці прилади використовуються при заданому режимі $F = const$, тому що такий режим легко реалізується експериментально, шляхом навантаження рухомої пластини вагою вантажу, який опускається.

При здавалося б очевидній простоті використання зсувних пластометрів, на сьогоднішній день, на керамічних підприємствах України, реологія шихти визначається дуже рідко. Пояснюється це тим, що навіть при широкій гамі конструкцій таких приладів немає конструкції адаптованої до потреб галузі, тобто простої в використанні, з зрозумілою і легкою в реалізації методикою обробки результатів.

З переходом до ринкових відносин, витрати на підприємствах зведені до мінімуму. Тому дослідження реології шихти повинні бути мало затратними. В зв'язку з цим, в якості зразків для дослідження доцільно використовувати глинисту масу у тому вигляді в якому вона використовується в технологічному процесі, наприклад у вигляді свіжосформованих виробів (заготовок цегли, блоків,

черепиці, тощо) отриманих після екструзії в пресі. Конструкція пластометра повинна бути адаптованою до використання в якості зразків таких виробів.

Методика вимірювань і обробки результатів повинна бути простою і зрозумілою для працівника з звичайним рівнем кваліфікації. Її результатом повинна стати побудована реологічна крива з визначеними реологічними константами керамічної маси.

Пластометри та методики вимірювань, що використовувались раніше (наприклад методика Ребіндера), з одного боку не дозволяли здійснювати всю гаму вимірювань (як правило визначались тільки граничні напруження зсуву) та були складними і не точними в обробці результатів із-за неможливості досягнути стабільності параметрів процесу протікання шихти. Змінити ситуацію дозволяє впровадження комп'ютерних технологій, як в процес вимірювання так і в процес обробки результатів. За рахунок високої швидкодії можна спроектувати пластометри з можливістю визначення не тільки параметрів переміщення елементів пристрою, а й пов'язаних з ними параметрів часу, що в свою чергу дозволить визначати такі параметри як швидкість переміщення, прискорення, тощо. Також комп'ютерна обробка результатів дозволить автоматизувати розрахунки, і спростить отримання результатів для споживача.

Таким чином, метою даної статті є розробка:

- методу дослідження реокінематики керамічної шихти за допомогою зсувного пластометру з комп'ютеризованою системою вимірювання переміщення штока;
- обробки результатів вимірювання, побудови реологічної кривої керамічної маси та визначення реологічних констант необхідних для комп'ютерного моделювання потоку глинистої маси.

Практика показує, що найзручніше досліджувати реокінематику за допомогою зсувних пластометрів, що реалізують ідеальну модель зсувної течії (рис. 1). Ряд авторів вважають цю схему вимірювання оптимальною. Проте реалізувати її в класичному вигляді (з зовнішніми нерухомими і внутрішньою рухомою пластинами) важко. Особливо це важко для матеріалів з відносно високим напруженням зсуву, яким є керамічна маса.

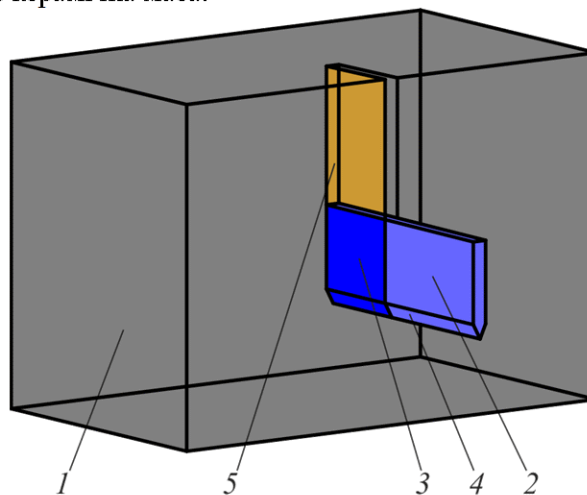


Рис. 2. Схема вимірювання реології керамічної маси: 1 – керамічний виріб; 2 – рухома пластинка; 3 – площа контакту з керамічною масою; 4 – загострена нижня поверхня; 5 – поверхня контакту з торцем пластинки.

З іншого боку в умовах виробництва найпростіше в якості досліджуваних зразків використовувати свіжосформовані керамічні вироби (цеглу, блоки, черепицю тощо).

Враховуючи сказане, нами запропонована схема вимірювання представлена на рис. 2. Процес протікання моделюється переміщенням сталеві пластини в досліджуваній рідині (керамічній масі).

Для зменшення сили опору товщина пластини повинна бути мінімальною (в нашому випадку 0,3 мм). При цьому доцільно нижню поверхню загострити у вигляді ножа (рис.2, поз. 4), для зменшення опору керамічній масі.

Обмежувати зону течії зовнішніми пластинами непотрібно, так як вона обмежується нерухомими шарами глини. Пояснюється це високим напруженням зсуву керамічної маси (рис. 3). Висота зони зсуву h є незначною, як правило менше 0,5 мм.

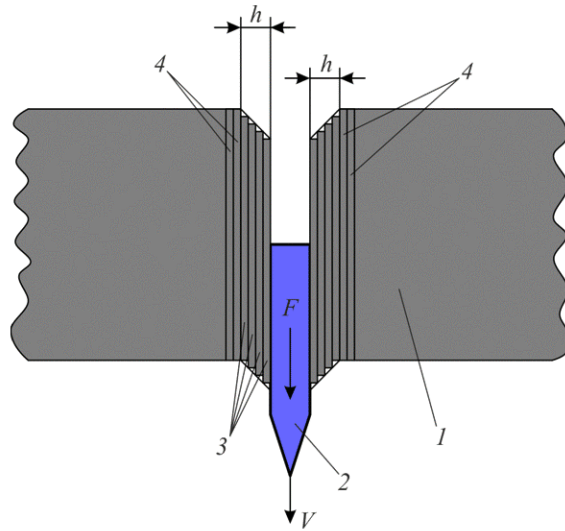


Рис. 3 Теоретична схема зсуву: 1 – керамічна маса; 2 – пластина що занурюється; 3 – рухомі шари; 4 – нерухомі шари

Дана схема реалізована на пластометрі представленою на рис. 4а. Пластометр інтегрований з комп'ютером, тому фіксує переміщення штока в певний момент часу з високою точністю, що в свою чергу дозволяє визначати його миттєву швидкість переміщення. Рухома пластина 4 на кінці штока 1 закріплена у вертикальному положенні, як показано на рис. 4б. Досліджуваний зразок (цегла, блок, тощо) взятий на виході з преса відразу після екструзії, розміщується на столі 2 пластометра. Сила зсуву пластини реалізується за рахунок сили тяжіння (F) штока з вантажем 3. Таким чином реалізується режим $F = const$.

При цьому припускаємо:

- пластина рухається без проковзування;
- опором глинистої маси на нижній (загострений) торець пластини нехтуємо;

Типовий графік переміщення пластини представлений на рис. 5а. На ньому можна виділити три ділянки:

AB – ділянка розгону пластини (рис.5, поз.1). Під дією сили тяжіння, пластина розганяється. Графік переміщення є нелінійним тому, що зростає сила опору зсуву внаслідок збільшення площі контакту пластини з керамічною масою.

BC – ділянка рівномірного переміщення (рис. 5, поз.2). Стаціонарність руху пояснюється постійним впливом сил, що діють на пластину – сили тяжіння та сили опору зсуву.

CD – ділянка розгону пластини під дією сили тяжіння (рис. 5, поз. 3). Графік є нелінійний так як пластина виходить за межі керамічної маси, зменшується її площа контакту, як наслідок зменшується сила опору зсуву.

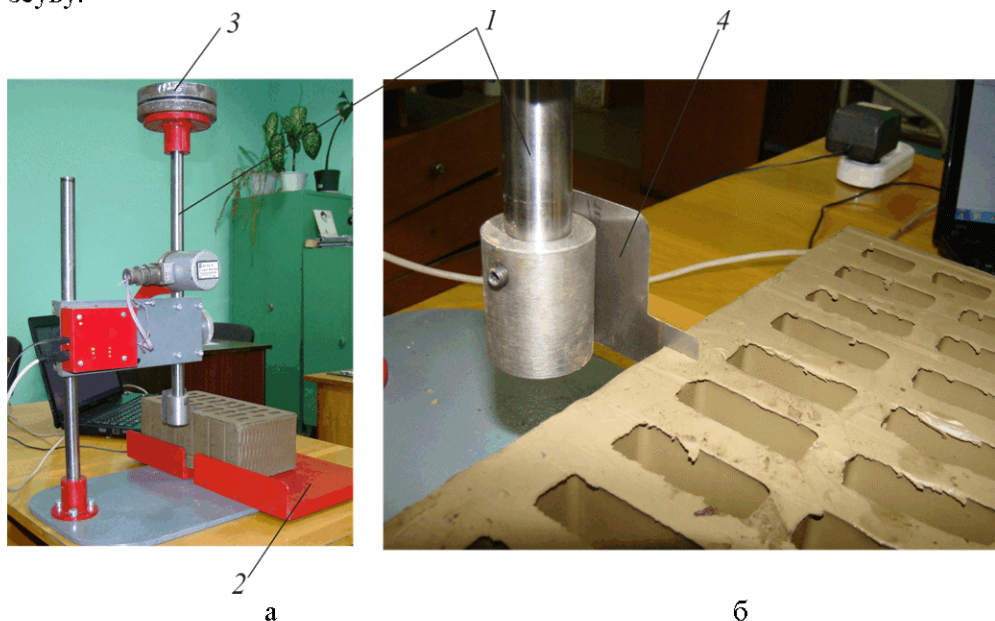


Рис. 4. Загальний вигляд пластометра (а) та рухомої пластини в момент вимірювання (б): 1 – шток; 2 – стіл; 3 – вантаж; 4 – пластина.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Для побудови реологічної кривої необхідно отримати ряд таких графіків при різних навантаженнях F_i . При цьому:

$$F_i = F_0 + \Delta F \cdot i,$$

де: $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n – кількість вимірювань; F_0 - навантаження граничного напруження зсуву; ΔF - дискретність збільшення навантаження, яка визначається експериментально для кожної шихти.

На початку експерименту визначили граничне напруження зсуву τ_0 та відповідне йому значення навантаження F_0 . Для цього навантажили пластометр вагою при якій пластина занурилась в керамічну масу приблизно на дві третини своєї площі (рис.4б):

$$\tau_0 = \frac{F_0}{S_0},$$

де: S_0 - площа контакту пластини з керамічною масою.

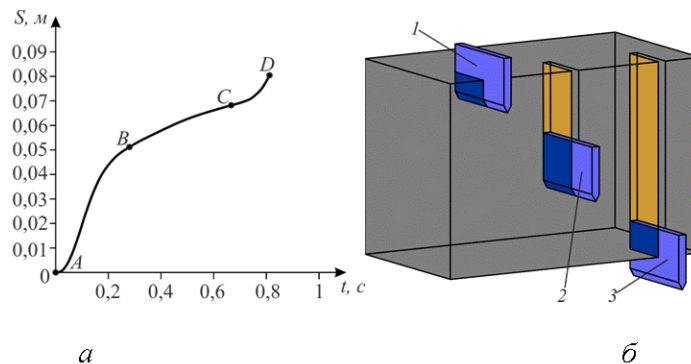


Рис. 5. Графік (а) та етапи переміщення (б) пластини в керамічній масі:
1 – етап занурення (ділянка АВ); 2 – етап стаціонарного руху (ділянка ВС);
3 – етап виходу (ділянка CD)

Щоб побудувати криві переміщення пластини, провели ряд експериментів при різних значеннях F_i . Побудову вели в системі «переміщення-час» згідно даних зафіксованих з частотою вимірювання 200 Гц. В результаті отримали множину кривих представлену на рис. 6.

Для кожної кривої виділили ділянку стаціонарного руху і провели її лінійну апроксимацію. Отримані лінії з функціями $S(t)$ також представлені на рисунку 6.

В результаті диференціювання отриманих залежностей, була визначена множина значень швидкостей переміщення пластини V_i .

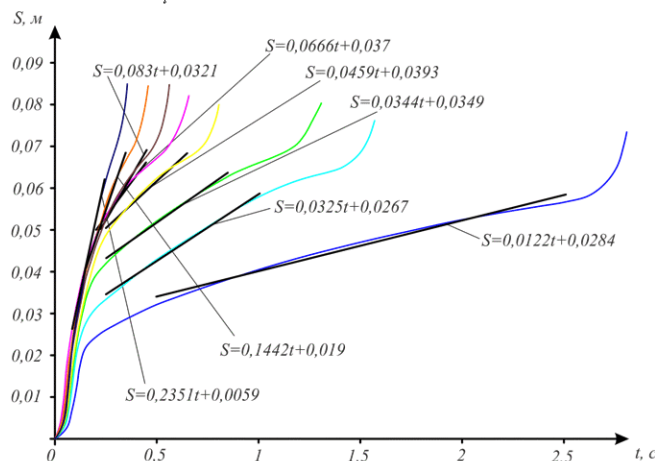


Рис. 6 Криві руху пластини (переміщення-час) з апроксимацією ділянок стаціонарного руху

Швидкість зсуву, згідно теоретичної схеми, рис. 3, знаходили за формулою:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{V_i}{h_i},$$

де: h_i - висота деформованого шару, м.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Висота деформованого шару h_i визначалась експериментально, шляхом аналізу під мікроскопом зони занурення та виходу пластини із досліджуваної маси (рис. 7). У випадку використання пластини, товщиною 0,3 мм, висота деформованого шару коливалася в межах 0,24-0,32 мм. Тому в розрахунках приймалось $h_i = h \approx 0,00027 \text{ м}$. Подальший аналіз при різних швидкостях руху пластини показав, що діапазон значень h_i є практично незмінним, тобто з високою ймовірністю можна припустити що $h_i = \text{const}$ при різних V_i .

Далі, для кожного визначеного значення $\dot{\gamma}_i$ знаходили відповідне напруження зсуву τ_i за формулою:

$$\tau_i = \frac{F_i}{S_i}$$

де S_i - площа контакту з керамічною масою.

Отримані значення $\dot{\gamma}_i$ та τ_i представлені в табл. 1, а на рис.8 побудована за ними реологічна крива.

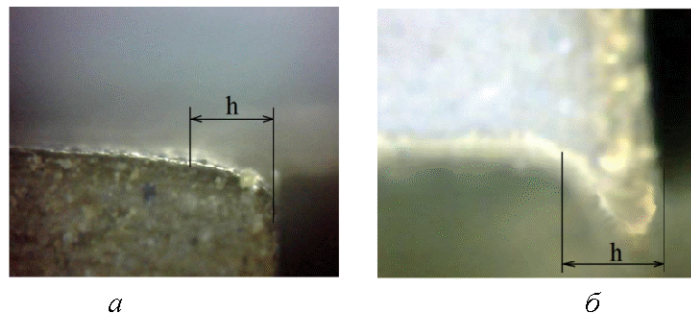


Рис. 7 Зона зсуву керамічної маси на вході (а) і на виході (б) пластини

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові дані необхідні для побудови реологічної кривої ($\tau_0 = 71931,41 \text{ Па}$)

№	$F_i, \text{ Н}$	$S_i(t), \text{ м}$	Квадрат критерія Пірсона, R^2	$V, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$h, \cdot 10^{-5} \text{ м}$	$\dot{\gamma}_i, \text{ с}^{-1}$	$\tau_i, \text{ Па}$
1	42,7	$S=0,0122t+0,0284$	0,9874	0,0122	27	45,19	78768,42
2	44,7	$S=0,0325t+0,0267$	0,9967	0,0325	27	120,37	82452,63
3	46,7	$S=0,0344t+0,0349$	0,995	0,0344	27	127,41	86136,84
4	48,7	$S=0,0459t+0,0393$	0,9862	0,0459	27	170,0	89821,05
5	50,7	$S=0,0666t+0,037$	0,9843	0,0535	27	198,15	93505,26
6	52,7	$S=0,083t+0,0321$	0,9868	0,083	27	307,41	97189,47
7	54,7	$S=0,1442t+0,019$	0,9839	0,1442	27	534,07	100873,7
8	56,7	$S=0,2351t+0,0059$	0,99	0,2351	27	870,74	104557,9

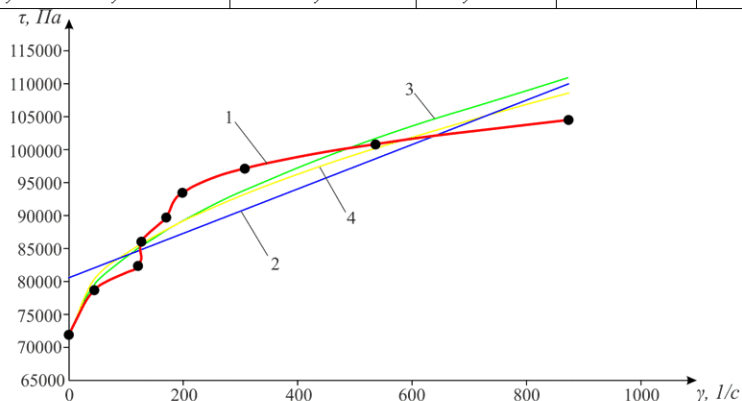


Рис. 8 Реологічна крива: 1 – експериментальна реологічна крива; 2 – апроксимація рівнянням Бінгама; 3 – апроксимація рівнянням Гершеля-Балклі; 4 – апроксимація рівнянням Кессона

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

В середовищі Excel, провели апроксимацію експериментальної кривої рівняннями Бінгама, Кессона та Гершеля-Балклі (рис. 8, табл. 2).

Таблиця 2

Рівняння та квадрат критерія Пірсона для кривих апроксимації

Назва рівняння кривої апроксимації	Рівняння кривої апроксимації	Квадрат критерія Пірсона, R^2
Бінгама	$\tau = 80563 + 33,778 \cdot \dot{\gamma}$	0,7634
Кессона	$\tau^{0,5} = 73175,66^{0,5} + (4,02 \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$	0,9295
Гершеля-Балклі	$\tau = 71931,41 + 933,4 \cdot \dot{\gamma}^{0,5514}$	0,9244

Для опису течії глинистої маси ряд авторів [3, 4, 6] та ін. використовують реологічну модель Бінгама. Проте наші дослідження показали, що експериментальна реологічна крива течії глинистої маси по критерію Пірсона (R^2) з найвищим ступенем відтворення описується рівняннями Кессона ($R^2 = 0,9295$) та Гершеля-Балклі ($R^2 = 0,9244$). Так як ступінь відтворення останньої є незначно нижчий ніж моделі Кессона, і на практиці користуватися нею набагато зручніше, надалі для моделювання потоку керамічної маси в середовищі SolidWorks використаємо власне модель Гершеля-Балклі ($K = 933,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $n = 0,5514$).

Таким чином в даній статті:

- запропонована схема моделювання течії керамічної маси шляхом протягування сталльної пластини, вздовж стінки свіжосформованого керамічного виробу, при якій забезпечується стаціонарний рух з постійним значенням параметрів: площі контакту - S , навантаження - F та швидкості руху - V ;
- за результатами проведених експериментів побудовані криві переміщення пластини, розраховані параметри $\dot{\gamma}_i$ та τ_i , та побудована реологічна крива;
- в середовищі Excel, проведена апроксимація експериментальної кривої рівняннями Бінгама, Кессона та Гершеля-Балклі;
- за критерієм Пірсона визначено, що з найвищим ступенем відтворення отримана реологічна крива описується рівнянням Гершеля-Балклі. Для даного рівняння визначені значення реологічних констант;

За отриманими результатами надалі буде розроблена методика визначення реологічних властивостей керамічної маси в умовах виробництва керамічних виробів.

Інформаційні джерела

1. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения/Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007.-560 стр., ил.
2. Основы практической реологии и реометри/Пер. с англ. И. А. Лавыгина; Под ред. В.Г. Куличихина – М.: КолосС, 2003.-312 с.
3. Барабанщиков Ю. Г. Формирование структуры и прочности строительных материалов при трении водосодержащих сырьевых смесей : автореф. дис. на соискание степени доктора техн. наук : спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»/Ю.Г. Барабанщиков. - Санкт-Петербург, 2006. — 36 с.
4. Frank Handle (Ed.). Extrusion in Ceramics./Handle Frank. - Berlin: Springer, 2007. - 470 с.
5. Крих Г.Б. Особливості застосування реологічних моделей неньютонівських рідин / Г.Б. Крих // Національний університет «Львівська політехніка».-2007.
6. Бакаев Д. Р. Совершенствование технологии экструдирования вязкопластических масс для повышения качества пустотелых керамических изделий: дис. канд. техн. наук: 05.03.05/ Денис Радмирович Бакаев.-Магнитогорск, 2003. – 161 с.
7. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks / Алямовский А.А. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.