

# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С АЛГОРИТМОМ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЖИДКОСТИ С ЭФФЕКТОМ «ОТВЕРДЕВАНИЯ»

В.Н. Колодежнов, А.В. Колтаков, С.С. Капранчиков, А.С. Веретенников

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Предложена методика обработки экспериментальных данных и алгоритм для ее реализации по определению параметров реологической модели вязкопластической жидкости, которая демонстрирует проявление эффекта «отвердевания». С целью проверки работоспособности алгоритма проведены численные эксперименты с наборами генерируемых случайным образом «псевдоэкспериментальных» данных с заранее заданной величиной максимальной относительной погрешности. Проведен анализ влияния максимальной относительной погрешности исходных «псевдоэкспериментальных» данных на величину относительной погрешности определяемых в ходе численных экспериментов параметров реологической модели. По итогам проведенных экспериментов показано, что относительная погрешность определения параметров реологической модели соизмерима с максимальной погрешностью генерируемых «псевдоэкспериментальных» данных. Рассмотрен пример обработки экспериментальных данных для суспензии частиц карбоната кальция на основе полиэтиленгликоля.

*Ключевые слова:* реологическая модель, численный эксперимент, псевдоэкспериментальные данные.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрение задач гидродинамики различных рабочих сред в каналах технологического оборудования предполагает использование реологических моделей, описывающих их поведение. Часто в качестве таких рабочих сред выступают жидкости, пред-ставляющие собой суспензии мелкодисперсных частиц, для которых зависимость вязкости от скорости сдвига является нелинейной [1–3].

При этом, для случаев достаточно высокой концентрации твердой фазы в рассматриваемой суспензии наблюдаются аномалии вязкого поведения [4–8], связанные, в частности, с тем, что увеличение скорости сдвига при ее приближении к некоторому пороговому значению приводит к резкому возрастанию вязкости и как следствие проявлению так называемого эффекта «отвердевания» или «упрочнения» [9,10].

В связи с этим, для описания реологического поведения такого рода жидкостей используются специальные реологические модели, определяющие зависимость между скоростью сдвига и касательным напряжением. В тоже время применение этих моделей при проведении инженерных расчетов предполагает знание параметров, входящих в основные реологические соотношения.

Определение параметров реологических моделей, описывающих с достаточной точностью поведение рассматриваемой жидкости является важной задачей. Она, естественно, должна быть основана на обработке

данных соответствующих вискозиметрических экспериментов по определению зависимости касательного напряжения от скорости сдвига.

Подход к определению параметров реологической модели вязкопластической жидкости с эффектом «отвердевания» был рассмотрен в [11]. В развитие этого подхода в [12] был предложен алгоритм определения параметров реологической модели на основе обработки экспериментальных данных зависимости касательного напряжения от скорости сдвига.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе представлены результаты численных экспериментов, проведенных на основе методики из работы [12] обработки экспериментальных данных зависимости касательных напряжений от скорости сдвига по определению параметров реологической модели жидкости, демонстрирующей эффект «отвердевания». В частности, проводилось определение параметров следующей реологической модели вязкопластической жидкости [13]

$$|\tau| = \tau_s - (\tau_s - \tau_p) \cdot \left(1 - \frac{|\dot{\gamma}|}{\dot{\gamma}_s}\right)^n; \quad 0 < n < 1. \quad (1)$$

где  $\tau_p$  - предельное напряжение сдвига;  $\dot{\gamma}_s$  - пороговое значение скорости сдвига;  $\tau_s$  - значение касательного напряжения при  $|\dot{\gamma}| = \dot{\gamma}_s$ ;  $n$  - параметр модели.

Такая модель предполагает монотонное увеличение значения вязкости по мере возрастания

скорости сдвига. Причем приближение скорости сдвига к соответствующему пороговому значению  $|\dot{\gamma}| \rightarrow \dot{\gamma}_s$  приводит к проявлению эффекта “отвердевания”.

Использование этой реологической модель предполагает знание четырех параметров  $n, \dot{\gamma}_s, \tau_p, \tau_s$ , определение которых предполагает некоторые особенности.

Прежде всего, отметим, что в разряд искомых параметров входит константа  $\dot{\gamma}_s$ , определяющая собой область, на которой задается аппроксимирующая функция (1). Кроме того, в этой неизвестной заранее точке  $|\dot{\gamma}| = \dot{\gamma}_s$  должно

выполняться следующее специфическое условие возникновения эффекта “отвердевания” [13]

$$\lim_{|\dot{\gamma}| \rightarrow \dot{\gamma}_s} \left\{ \frac{d|\tau(\dot{\gamma})|}{d|\dot{\gamma}|} \right\} = \infty .$$

В [12] был предложен алгоритм определения параметров реологической модели (1) на основе обработки набора экспериментальных данных  $\{\dot{\gamma}_i; \tau_i\}$   $i = 1, 2, \dots, N$ ; для значений, соответственно, скорости сдвига и касательного напряжения. Блок-схема предлагаемого алгоритма для определения параметров реологической модели (1) представлена на рис. 1.

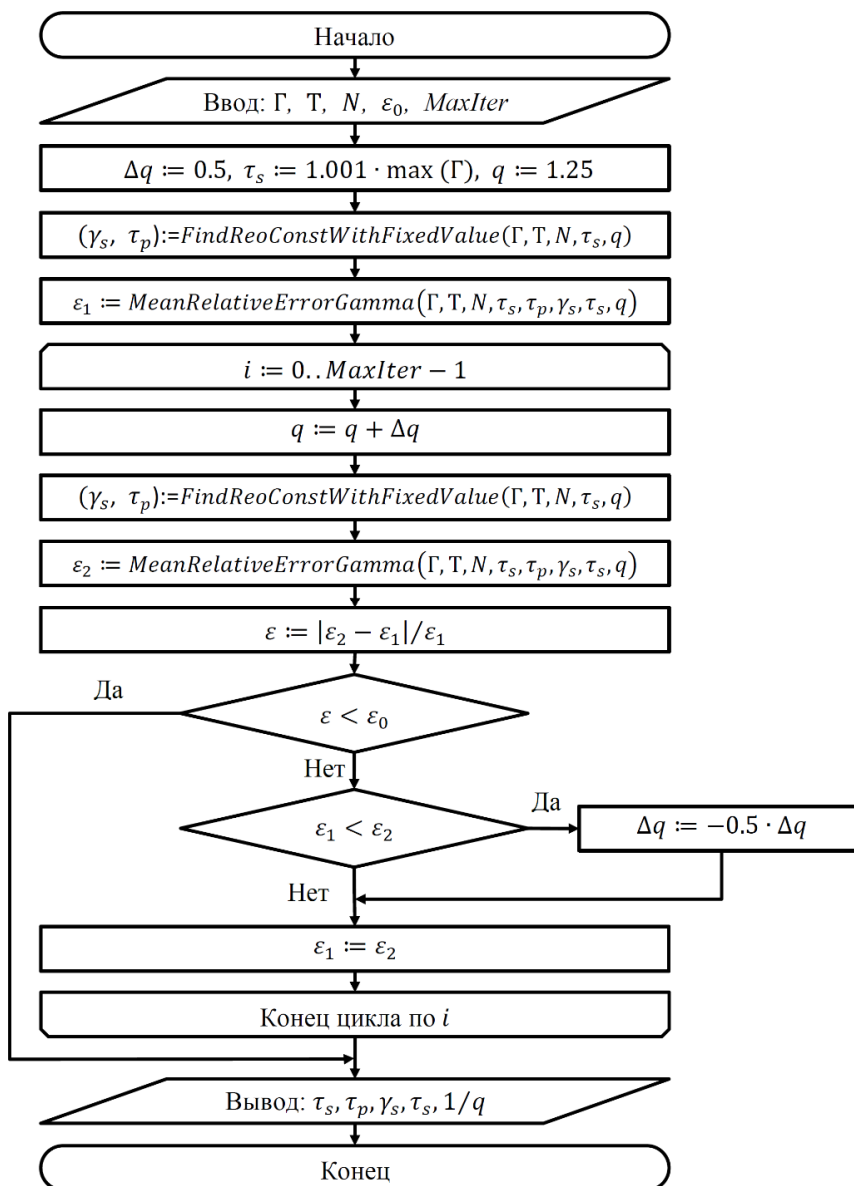


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

В этом алгоритме функция *FindReoConstWithFixedValue* ( $\Gamma, T, N, \tau_s, q$ ) предназначена для вычисления на основе массивов  $\dot{\gamma}_i \in \Gamma$ ; и  $\tau_i \in T$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$  экспериментальных данных значений параметров модели  $\dot{\gamma}_s$  и  $\tau_p$  по задаваемым значениям параметров  $\tau_s$  и  $q = 1/n$ .

В свою очередь еще одна функция *MeanRelativeErrorGamma* ( $\Gamma, T, N, \tau_s, \gamma_s, \tau_s, q$ ) позволяет находить среднюю относительную погрешность между экспериментальными значения  $\dot{\gamma}_i \in \Gamma$  и значениями скорости сдвига, вычисленными для соответствующих значений  $\tau_i \in T$  с помощью аппроксимирующей зависимости для набора  $\tau_s, \gamma_s, \tau_s, q$  параметров модели.

С целью проверки работоспособности предложенного алгоритма [12] были проведены численные эксперименты, имитирующие определение параметров реологической модели гипотетической вязкопластической жидкости, которая демонстрирует проявление эффекта “отвердевания”.

За основу при проведении таких численных экспериментов была принята реологическая модель (1), в которую были заложены следующие точные значения параметров:

$$\begin{aligned} \tau_s^{true} &= 157.394 \text{ Па}; \quad \tau_p^{true} = 12.749 \text{ Па}; \\ \dot{\gamma}_s^{true} &= 16.289 \text{ с}^{-1}; \quad n^{true} = 0.137. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что такие числовые значения близки к значениям параметров реологической модели (1), полученных на основе обработки экспериментальных данных [14] для реальных суспензий при достаточно большой объемной концентрации мелкодисперсных частиц карбоната кальция на основе полиэтиленгликоля.

Для проведения численных экспериментов были приняты двадцать произвольных исходных значений касательного напряжения из диапазона  $\tau_i^{true} \in [\tau_p^{true}; \tau_s^{true}]$ ;  $i = 1, 2, \dots, 20$ , каждому из которых с учетом (1), (2) были поставлены в соответствие двадцать значений скорости сдвига  $\dot{\gamma}_i^{true}$ .

Вычисленные значения касательного напряжения и скорости сдвига  $\{\tau_i^{true}; \dot{\gamma}_i^{true}\}$  были приняты за основу при генерировании набора “псевдоэкспериментальных” данных согласно следующим соотношениям

$$\begin{aligned} \tau_i &= \tau_i^{true} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta \tau_{max}}{100} \cdot \xi_{\tau,i} \right); \\ \dot{\gamma}_i &= \dot{\gamma}_i^{true} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta \dot{\gamma}_{max}}{100} \cdot \xi_{\dot{\gamma},i} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, 20,$

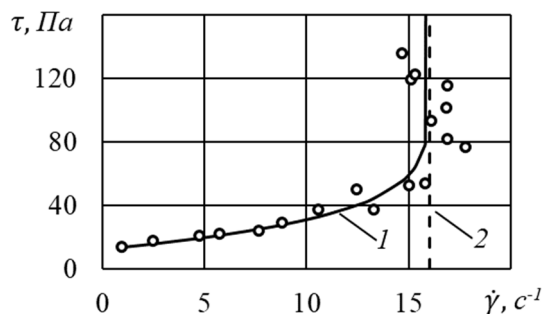
где  $\xi_{\tau,i}, \xi_{\dot{\gamma},i}$  – случайные числа, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием  $\mu = 0$  и дисперсией (среднеквадратичной ошибкой)  $\sigma = 0.333$ .

Приведенные здесь параметры нормального распределения указывают на то, что не менее 99.7 % случайных чисел  $\xi_{\tau,i}$  и  $\xi_{\dot{\gamma},i}$  примут значения из отрезка  $[-1; 1]$ . В такой ситуации параметры  $\Delta \tau_{max}$  и  $\Delta \dot{\gamma}_{max}$  в (3) можно с хорошей точностью интерпретировать, как выраженные в процентах максимальные относительные погрешности “псевдоэкспериментальных” данных для касательного напряжения и скорости сдвига, соответственно, по отношению к точным их значениям, определенным на основе (1) с учетом (2).

Полученные по такой схеме наборы “псевдоэкспериментальных” данных с заранее заданными максимальными относительными погрешностями  $\Delta \tau_{max}$  и  $\Delta \dot{\gamma}_{max}$  обрабатывались далее с помощью предложенного алгоритма с целью определения на их основе “псевдоэкспериментальных” значений  $\tau_s^{exp}, \tau_p^{exp}, \dot{\gamma}_s^{exp}$ ,  $n^{exp}$  параметров реологической модели (1).

Была проведена серия численных экспериментов по обработке наборов “псевдоэкспериментальных” данных с различными значениями задаваемой максимальной относительной погрешности, которая варьировалась в пределах от 0.5% до 25%.

В качестве примера на рис. 2 приводятся результаты для численного эксперимента, с достаточно высоким значением максимальных относительных погрешностей “псевдоэкспериментальных” данных, в частности для  $\Delta \tau_{max} = \Delta \dot{\gamma}_{max} = 20\%$ .



1 – график аппроксимирующей зависимости  $\tau(\dot{\gamma})$ ;

$$2 - \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s^{exp} = 16.035 \text{ с}^{-1}$$

Рис. 2. Кривая течения и набор “псевдоэкспериментальных” точек  $\{\tau_i^{exp}; \dot{\gamma}_i^{exp}\}$  для случая  $\Delta \tau_{max} = \Delta \dot{\gamma}_{max} = 20\%$ .

В ходе этого численного эксперимента были получены следующие значения основных параметров реологической модели (1)

$$\begin{aligned} \tau_s^{\text{exp}} &= 166.040 \text{ Па}; & \tau_p^{\text{exp}} &= 12.320 \text{ Па}; \\ \dot{\gamma}_s^{\text{exp}} &= 16.035 \text{ с}^{-1}; & n^{\text{exp}} &= 0.133. \end{aligned} \quad (4)$$

Отклонение этих результатов от исходных значений (2) составило

$$\begin{aligned} \frac{|\tau_s^{\text{true}} - \tau_s^{\text{exp}}|}{\tau_s^{\text{true}}} \cdot 100\% &= 5.493\%; \\ \frac{|\tau_p^{\text{true}} - \tau_p^{\text{exp}}|}{\tau_p^{\text{true}}} \cdot 100\% &= 3.365\%; \\ \frac{|\dot{\gamma}_s^{\text{true}} - \dot{\gamma}_s^{\text{exp}}|}{\dot{\gamma}_s^{\text{true}}} \cdot 100\% &= 1.252\%; \\ \frac{|n^{\text{true}} - n^{\text{exp}}|}{n^{\text{true}}} \cdot 100\% &= 2.920\%. \end{aligned}$$

При этом средняя относительная погрешность "псевдоэкспериментальных" данных (для скорости сдвига) по отношению к значениям, получаемым с учетом (4) для рассмотренного примера принимает значение  $\varepsilon = 8.493\%$ .

Результаты отдельных численных экспериментов, иллюстрирующие влияние максимальных относительных погрешностей  $\Delta\tau_{\text{max}}$  и  $\Delta\dot{\gamma}_{\text{max}}$  "псевдоэкспериментальных" данных для частного случая  $\Delta\tau_{\text{max}} = \Delta\dot{\gamma}_{\text{max}} = \Delta_{\text{max}}$  на величину  $\varepsilon$  средней относительной погрешности этих данных по отношению к их аппроксимирующей кривой, представлены на рис. 3.

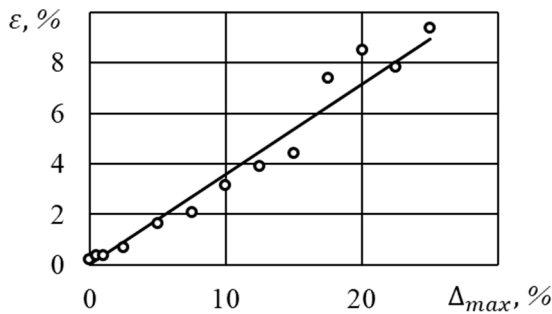
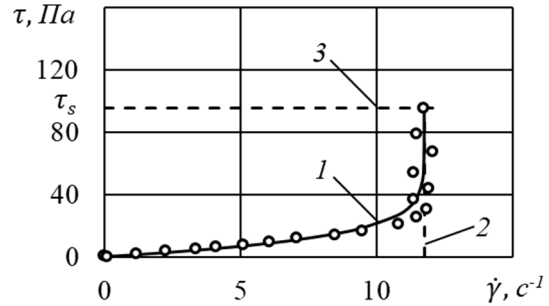


Рис. 3. Результаты анализа погрешностей отдельных численных экспериментов, представленных в виде зависимости  $\varepsilon$  от  $\Delta_{\text{max}}$ , и их линейная аппроксимация

Подобные результаты имеют место и в случае, когда  $\Delta\tau_{\text{max}} \neq \Delta\dot{\gamma}_{\text{max}}$ .

В качестве еще одного примера на рис. 4 приводится набор экспериментальных точек зависимости касательного напряжения от скорости сдвига, построенной на основе обработки реальных данных из работы [8].

Здесь за основу был взят фрагмент (включая лишь 19 экспериментальных точек в диапазоне достаточно малых значений скорости сдвига) из полного комплекта представленных в этой работе экспериментальных данных, который демонстрирует, по сути, проявление эффекта "отвердевания".



1 – график аппроксимации экспериментальных данных в рамках реологической модели (1); 2 –  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_s^{\text{exp}} = 11.745 \text{ с}^{-1}$ ;

$$3 - \tau = \tau_s^{\text{exp}} = 95.710 \text{ Па}$$

Рис. 4. Экспериментальные данные [14] и аппроксимирующая их кривая зависимости касательного напряжения от скорости сдвига

Авторами работы [8] в качестве жидкой основы суспензии был использован полиэтиленглюколь. Твердая фаза суспензии состояла из частиц осажденного карбоната кальция с объемной концентрацией  $\phi = 0.47$ . По своей форме твердые частицы суспензии были близки к вытянутым эллипсоидам со следующими геометрическими параметрами: продольный размер -  $567 \pm 217 \text{ нм}$ ; поперечный размер -  $328 \pm 103 \text{ нм}$ .

Поведение представленных на этом рисунке экспериментальных точек дает основание предположить, что на рассматриваемом диапазоне изменения скорости сдвига возможно использование реологической модели (1) для описания механического поведения такой рабочей среды.

После обработки этих экспериментальных данных по изложенной выше методике были получены следующие значения параметров реологической модели (1):

$$\begin{aligned} \tau_s &= 95.710 \text{ Па}; & \tau_p &= 0.207 \text{ Па}; \\ \dot{\gamma}_s &= 11.745 \text{ с}^{-1}; & n &= 0.131 \end{aligned}$$

При этом, средняя относительная погрешность экспериментальных данных (для скорости сдвига) по отношению к аппроксимирующей кривой составила  $\varepsilon = 9.232\%$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм обработки экспериментальных данных позволяет с удовлетворительной точностью определять параметры реологической модели вязкопластической

жидкости, которая демонстрирует проявление эффекта “отвердевания”.

*Веретенников Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин, ВУНЦ ВВС «ВВА», тел. +7(980)5394266, e-mail: vas3141@gmail.ru*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Boyer F., Guazelli E. and O. Pouliquen, “Unifying Suspensions and Granular Rheology”, *Phys. Rev. Lett.*, 2011. V. 107. 188301. P. 1–5.
2. Cwalina, C. D., and N. J. Wagner, “Material properties of the shear-thickened state in concentrated near hard-sphere colloidal dispersions,” *J. Rheol.*, 2014 58, 949–967.
3. Скульский, О.И. Реометрические течения концентрированных суспензий твердых частиц [Текст] / О.И. Скульский // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. Т. 13. № 3. С. 269 – 278.
4. Wetzel, E.D., et al, “The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF) – Kevlar Composites”, *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, NUMIFORM 2004.* / Edited by S. Ghosh, J.C. Castro and J.K. Lee. – American Institute of Physics. P. 288 – 293.
5. Bischoff White E.E. Extensional rheology of a shear-thickening cornstarch and water suspension. / E.E. Bischoff White, Chellamuthu Manoj, J.P. Rothstein // *Rheol Acta*, 2010. V. 49. P. 119 – 129.
6. Singh A., et al, “A constitutive model for simple shear of dense frictional suspensions” *J. Rheol.*, 2018. V. 62. P. 457-468.
7. Ting-Ting Li, et al, “Effects of STF and Fiber Characteristics on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Impregnated UHMWPE/Kevlar Compo-site Fabrics”, *Fibers and Polymers*. 2019. V. 20, P. 328–336.
8. Nakamura H., S. Makino, and M. Ishii, “Continuous shear thickening and discontinuous shear thickening of concentrated monodispersed silica slurry”, *Advanced Powder Technology*, 2020. V. 31, Issue 4, P. 1659-1664.
9. Матвеевко, В.Н. Вязкость и структура дисперсных систем [Текст] / В.Н. Матвеевко, Е.А. Кирасанов // *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*, 2011. Т. 52. № 4. С. 243 – 276.
10. Brown, E., and H. M. Jaeger, “ Shear thickening in concentrated suspensions: Phenomenology, mechanisms and relations to jamming,” *Rep. Prog. Phys.*, 2014. V.77, 046602. P. 1–24.
11. Колодежнов, В.Н. Методика определения параметров реологической модели вязкопластической жидкости с эффектом “отвердевания” [Текст] / В.Н. Колодежнов, А.В. Колтаков, С.С. Капранчиков // *Современные проблемы механики и ее преподавание в вузе: труды Всероссийской научно-методической конференции. В 2 т. Т. I.* – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. С. 182-185.
12. Методика обработки экспериментальных данных и алгоритм для ее реализации по определению параметров реологической модели дилатантной жидкости с эффектом “отвердевания” / В.Н. Колодежнов [и др.] // *Южно-Сибирский научный вестник.* – 2021. – № 5 (39). – С. 101–105.
13. Колодежнов, В.Н. Математическая модель реологического поведения вязкопластической жидкости, которая демонстрирует проявление эффекта “отвердевания” [Текст] / В.Н. Колодежнов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* - 2014. - № 2 (60). С. 55 – 58.
14. Egres, R.G. and N.J. Wagner, “The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition”, *Journal of Rheology*. Vol. 49 (3). - 2005. P. 719-746.

*Колодежнов Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин, ВУНЦ ВВС «ВВА», тел. +7(980)5394266, e-mail: kvn117@mail.ru*

*Колтаков Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин, ВУНЦ ВВС «ВВА», тел. +7(980)5394266, e-mail: kv32@mail.ru*

*Капранчиков Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин, ВУНЦ ВВС «ВВА», тел. +7(980)5394266, e-mail: skapr@mail.ru*

# NUMERICAL EXPERIMENTS WITH AN ALGORITHM FOR PROCESSING EXPERIMENTAL DATA TO DETERMINE THE PARAMETERS OF A RHEOLOGICAL MODEL OF A LIQUID WITH THE EFFECT OF «SOLIDIFICATION»

V.N. Kolodezhnov, A.V. Koltakov, S.S. Kapranchikov, A.S. Veretennikov

*Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh*

A technique for processing experimental data and an algorithm for its implementation to determine the parameters of a rheological model of a viscoplastic fluid, which demonstrates the manifestation of the "hardening" effect, are proposed. In order to test the algorithm's operability, numerical experiments were carried out with sets of randomly generated "pseudo-experimental" data with a predetermined maximum relative error. The analysis of the influence of the maximum relative error of the initial "pseudo-experimental" data on the value of the relative error of the parameters of the rheological model determined during numerical experiments was carried out. Based on the results of the conducted experiments, it is shown that the relative error in determining the parameters of the rheological model is commensurate with the maximum error of the generated "pseudo-experimental" data. An example of processing experimental data for a suspension of calcium carbonate particles based on polyethylene glycol is considered.

Index terms: rheological model, numerical experiment, pseudo-experimental data.

## REFERENCES

1. Boyer F., Guazelli E. and O. Pouliquen, "Unifying Suspensions and Granular Rheology", *Phys. Rev. Lett.*, 2011. V. 107. 188301. P. 1–5.
2. Cwalina, C. D., and N. J. Wagner, "Material properties of the shear-thickened state in concentrated near hard-sphere colloidal dispersions," *J. Rheol.*, 2014 58, 949–967.
3. Skulsky, O.I. "Geometric flows of concentrated suspensions of solid particles", *Computational mechanics of continuous media*. - 2020. Vol. 13. No. 3. pp. 269 - 278.
4. Wetzel, E.D., et al, "The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF) – Kevlar Composites", *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, NUMIFORM 2004*. / Edited by S. Ghosh, J.C. Castro and J.K. Lee. – American Institute of Physics. P. 288 – 293.
5. Bischoff White E.E. Extensional rheology of a shear-thickening cornstarch and water suspension. / E.E. Bischoff White, Chellamuthu Manoj, J.P. Rothstein // *Rheol Acta*, 2010. V. 49. P. 119 – 129.
6. Singh A., et al, "A constitutive model for simple shear of dense frictional suspensions" *J. Rheol.* , 2018. V. 62. P. 457-468.
7. Ting-Ting Li, et al, "Effects of STF and Fiber Characteristics on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Impregnated UHMWPE/Kevlar Compo-site Fabrics", *Fibers and Polymers*. 2019. V. 20, P. 328–336.
8. Nakamura H., S. Makino, and M. Ishii, "Continuous shear thickening and discontinuous shear thickening of concentrated monodispersed silica slurry", *Advanced Powder Technology*, 2020. V. 31, Issue 4, P. 1659-1664.
9. Matvienko, V.N. and E.A. Kirsanov, "Viscosity and structure of dispersed systems", *Bulletin of the Moscow University. Series 2. Chemistry*, 2011. Vol. 52. No. 4. pp. 243 - 276.
10. Brown, E., and H. M. Jaeger, "Shear thickening in concentrated suspensions: Phenomenology, mechanisms and relations to jamming," *Rep. Prog. Phys.*, 2014. V.77, 046602. P. 1–24.
11. Kolodezhnov, V.N., A.V. Koltakov and S.S. Kapranchikov, "Method of determining the parameters of a rheological model of a viscoplastic fluid with the effect of "hardening"", *Modern problems of mechanics and its teaching at the university: proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference*. In 2 vols. T. I. - St. Petersburg: A.F. Mozhaisky VKA, 2015. pp. 182-185.
12. Kolodezhnov, V.N., et al, "The method of processing experimental data and the algorithm for its implementation to determine the parameters of the rheological model of a dilatant liquid with the effect of "solidification"", *South Siberian Scientific Bulletin*. – 2021. – № 5 (39). – С. 101–105.
13. Kolodezhnov, V.N. "Mathematical model of rheological behavior of viscoplastic fluid, which demonstrates the manifestation of the "hardening" effect", *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. - 2014. - № 2 (60). Pp. 55-58.
14. Egres, R.G. and N.J. Wagner, "The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition", *Journal of Rheology*. Vol. 49 (3). - 2005. P. 719-746.

*Kolodezhnov Vladimir Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair of General Professional Disciplines, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», tel. +7(980)5394266, e-mail: kvn117@mail.ru*

*Koltakov Alexander Viktorovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair of General Professional Disciplines, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», tel. +7(980)5394266, e-mail: kv32@mail.ru*

*Kapranchikov Sergey Sergeevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair of General Professional Disciplines, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», tel. +7(980)5394266, e-mail: skapr@mail.ru*

*Veretennikov Alexander Sergeevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair of General Professional Disciplines, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», tel. +7(980)5394266, e-mail: vas3141@gmail.ru*