05.13.18

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АЛГОРИТМ ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИЛАТАНТНОЙ 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

В различных технических приложениях применяются рабочие среды типа суспензий, которые при достаточно высокой концентрации частиц твердой фазы демонстрируют аномалии вязкости. Существо этих аномалий заключается в том, что при приближении скорости сдвига к некоторому пороговому значению наблюдается явление резкого возрастания вязкости жидкости. При этом в соответствующих зонах течения рабочая среда начинает вести себя подобно твердому телу. Механическое поведение такой рабочей среды может быть описано в рамках реологической модели вязкопластической жидкости, которая позволяет учитывать проявление эффекта “упрочнения” или “отвердевания”. Рассмотрена методика определения параметров такой реологической модели на основе обработки экспериментальных данных зависимости касательного напряжения от скорости сдвига. Предложен алгоритм для реализации этой методики.

Ключевые слова: модель вязкопластической жидкости, эффект «отвердевания».

ВВЕДЕНИЕ

В различных технических приложениях находят постоянное применение рабочие среды, которые, по сути, представляют собой суспензии мелкодисперсных частиц, демонстрирующих достаточно сложное механическое поведение. В частности, для суспензий зависимость вязкости от скорости сдвига носит, как правило, существенно нелинейный характер [1, 2, 3].

К этому следует добавить, что для достаточно высокой объемной концентрации частиц твердой фазы наблюдаются аномалии вязкого поведения [4], которые сводятся к следующему эффекту. При приближении скорости сдвига к некоторому пороговому значению, вязкость начинает настолько резко возрастать, что в соответствующих зонах течения рабочая среда начинает вести себя подобно твердому телу. Такую ситуацию предлагается интерпретировать, как проявление эффекта “упрочнения” или “отвердевания”. Подробный обзор различных аспектов поведения концентрированных суспензий представлен в [5].

При проведении инженерных расчетов, связанных с гидродинамикой сред такого рода в проточных элементах технологического оборудования, возникает необходимость учета таких особенностей через постулирование соответствующих реологических моделей.

Такие модели устанавливают функциональную связь между скоростью сдвига и касательным напряжением, возникающим в рабочей среде. При этом может быть поставлена еще одна самостоятельная задача, связанная с определением параметров вводимых реологических моделей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе рассмотрена реологическая модель суспензии [6], жидкая основа которой представляет собой нелинейную вязкопластическую жидкость, которая демонстрирует проявление эффекта “отвердевания”. В рамках этой модели традиционно предполагается, что при значениях касательного напряжения, не превышающих предела текучести, деформирование материала отсутствует. Превышение же этого предела приводит к сдвиговому течению жидкости. Однако в модели заложено еще одно обстоятельство, которое заключается в следующем. Повышенное деформирование рабочей среды и увеличение скорости сдвига при ее приближении к некоторому пороговому уровню приводит к проявлению эффекта “отвердевания”.

Пусть механическое поведение суспензии для случая простейшего одномерного вискозиметрического течения с одной, тождественно не равной нулю составляющей скорости, удовлетворяет следующей реологической модели вязкопластической жидкости [6]

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

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

Заметим, что такая модель обеспечивает монотонное возрастание вязкости по мере увеличения скорости сдвига в диапазоне $|\dot{\gamma}| \in [0; \dot{\gamma}_s]$. При этом предельный случай $|\dot{\gamma}| \to \dot{\gamma}_s$ обеспечивает выполнение условия, которое предлагается интерпретировать, как проявление эффекта “отвердевания”.

Рассматриваемая реологическая модель содержит четыре параметра n, $\dot{\gamma}_s$, τ, τ_s. При этом любое использование этой модели, например, в ходе проведения на ее основе соответствующих инженерных расчетов, должно предполагать знание конкретных значений этих параметров.

В свою очередь, определение этих параметров, естественно, должно проводиться на основе обработки данных соответствующих вискозиметрических экспериментов для зависимости касательного напряжения от скорости сдвига.

Однако, прямое применение традиционных подходов решения задачи аппроксимации набора экспериментальных данных функцией заданного вида встречает в данном случае некоторые сложности.

Одна из возникающих при этом проблем обусловлена тем, что в разряд искомых параметров входит константа $\dot{\gamma}_s$, определяющая собой область, на которой задается аппроксимирующая функция (1).

Еще одна особенность заключается в том, что, вообще говоря, в неизвестной заранее точке $|\dot{\gamma}| = \dot{\gamma}_s$ должно выполняться специфическое условие возникновения эффекта “отвердевания”

$$\lim_{|\dot{\gamma}| \to \dot{\gamma}_s} \left\{ \frac{d\left|\tau(|\dot{\gamma}|)\right|}{d|\dot{\gamma}|} \right\} = \infty . \tag{2}$$

Указанные обстоятельства несколько усложняют задачу определения параметров реологической модели (1). Тем не менее, может быть предложена достаточно простая, но в то же время учитывающая эти обстоятельства, методика определения параметров этой реологической модели на основе обработки соответствующих экспериментальных данных.

Основные подходы к построению методики определения параметров реологической модели вязкопластической жидкости на основе обработки экспериментальных данных зависимости касательного напряжения от скорости сдвига были рассмотрены в [7].

В рамках такой методики может быть реализован следующий алгоритм определения констант реологической модели (1).

1$^{\text{O}}$. Задаемся массивом N пар экспериментальных значений скорости сдвига и касательного напряжения

$$\left\{ \dot{\gamma}_i ;\ \tau_i \right\}; \qquad i = 1, 2, ..., N .$$

Здесь и далее при записи скорости сдвига и напряжения знак модуля опускается и предполагается, что все экспериментальные данные удовлетворяют условиям $\dot{\gamma}_i > 0$; $\tau_i > 0$.

2$^{\text{O}}$. В рамках рассматриваемой модели (1) должно выполняться соотношение (2). Это означает, что для функции, которая является обратной к (1), должно выполняться условие

$$\left. \left(\frac{d\dot{\gamma}}{d\tau} \right) \right|_{\tau = \tau_s} = 0 . \tag{3}$$

Для краткости записи представим функцию обратную (1) в виде

$$\dot{\gamma}(\tau) = \dot{\gamma}_s - k \cdot (\tau_s - \tau)^q , \tag{4}$$

где $$k = \dot{\gamma}_s \cdot (\tau_s - \tau_p)^{-\frac{1}{n}} ; \qquad q = 1/n . \tag{5}$$

Отметим следующее обстоятельство. Если были бы заданы значения параметров q и τ_s, то соотношение (4) принимало бы линейный вид по отношению к двум оставшимся параметрам $\dot{\gamma}_s$ и k. Тогда эти два параметра было бы удобно определять на основе метода наименьших квадратов при соответствующем подборе вида функции невязки.

За основу для построения функции невязки примем абсолютное расхождение на участке $\tau_1 \le \tau \le \tau_N$ между площадью под графиком зависимости (4) и площадью под ломаной линией с экспериментальными значениями $\dot{\gamma}_i$; $i = 1, 2, ..., N$ в ее вершинах при соответствующих значениях τ_i; $i = 1, 2, ..., N$ касательного напряжения.

На каждом отдельном участке $\tau_i \le \tau \le \tau_{i+1}$; $i = 1, 2, ..., N-1$ площадь под графиком функции (4) определяется выражением

$$S_i^{(teor)} = \dot{\gamma}_s \cdot (\tau_{i+1} - \tau_i) + \frac{k}{q+1} \cdot \left\{ (\tau_s - \tau_{i+1})^{q+1} - (\tau_s - \tau_i)^{q+1} \right\} . \tag{6}$$

В свою очередь, на каждом из тех же участков площадь под ломаной линией, проходящей через каждую экспериментальную точку, находится следующим образом

$$S_i^{(\exp)} = \frac{1}{2} \cdot \left(\dot{\gamma}_i + \dot{\gamma}_{i+1} \right) \left(\tau_{i+1} - \tau_i \right) . \tag{7}$$

Тогда, функцию невязки для последующего нахождения параметров $\dot{\gamma}_s$ и k предлагается принять в форме

$$F\left(\dot{\gamma}_s, k \right) = \sum_{i=1}^{N-1} \left[S_i^{(teor)} - S_i^{(\exp)} \right]^2 .$$

Подставляя сюда (6), (7), получаем окончательный вид функции невязки, удобный для прямого применения метода наименьших квадратов

$$F\left(\dot{\gamma}_s, k \right) = \sum_{i=1}^{N-1} \left[\dot{\gamma}_s \cdot Q_{1i} + k \cdot Q_{2i} - Q_{3i} \right]^2 . \tag{8}$$

Здесь

$$Q_{1i} = (\tau_{i+1} - \tau_i)\ ;$$

$$Q_{2i} = \frac{1}{q+1} \cdot \left\{ (\tau_s - \tau_{i+1})^{q+1} - (\tau_s - \tau_i)^{q+1} \right\};$$

$$Q_{3i} = \frac{1}{2} \cdot (\dot{\gamma}_i + \dot{\gamma}_{i+1})(\tau_{i+1} - \tau_i)\ .$$

3$^{\text{O}}$. При заданных значениях параметров q и τ_s определение двух оставшихся параметров $\dot{\gamma}_s$ и k сводится с учетом (8) к решению следующей системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \dot{\gamma}_s + A_{12} \cdot k = B_1\ ; \\ A_{21} \cdot \dot{\gamma}_s + A_{22} \cdot k = B_2\ . \end{cases} \qquad (9)$$

Здесь приняты обозначения

$$A_{11} = \sum_{i=1}^{N-1} Q_{1i}^2\ ; \qquad A_{12} = \sum_{i=1}^{N-1} Q_{1i} \cdot Q_{2i}\ ; \qquad B_1 = \sum_{i=1}^{N-1} Q_{1i} \cdot Q_{3i}\ ;$$

$$A_{21} = A_{12}; \qquad A = Q\ ; \qquad B_2 = \sum_{i=1}^{N-1} Q_{2i} \cdot Q_{3i}\ .$$

Решение системы уравнений (9) имеет вид

$$\dot{\gamma}_s = \frac{B_1 \cdot A_{22} - B_2 \cdot A_{12}}{A_{11} \cdot A_{22} - A_{21} \cdot A_{12}}\ ; \qquad k = \frac{B \cdot A - B \cdot A}{A \cdot A - A \cdot A}\ . \qquad (10)$$

После нахождения значения k параметр τ_p реологической модели находится из выражения

$$\tau_p = \tau_s - \left(\frac{\dot{\gamma}_s}{k} \right)^{\frac{1}{q}}.$$

С учетом задаваемых значений параметров q и τ_s, а также только что найденных значений $\dot{\gamma}_s$ и k средняя относительная погрешность, выраженная в процентах, может быть определена из выражения

$$\varepsilon = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| \dot{\gamma}_s - k \cdot (\tau_s - \tau_i)^q - \dot{\gamma}_i \right|}{\dot{\gamma}_i}\ . \qquad (11)$$

4$^{\text{O}}$. Как следует из изложенного выше, значения параметров (10) зависят от выбора значений параметров q и τ_s.

Что касается выбора параметра τ_s, то его значение существенным образом влияет как на последующее определение параметров модели (1), так и на итоговую среднюю относительную погрешность аппроксимации экспериментальных данных посредством соотношения (4). При этом, как показывают предварительные численные эксперименты, в силу выполнения условия (3), в окрестности особой точки $\{ \dot{\gamma}_s, \tau_s \}$ отклонение значения касательного напряжения от истинного значения τ_s в сравнительно широком диапазоне не приводит к заметному отклонению скорости сдвига от значения $\dot{\gamma}_s$.

Это означает, что исходный набор экспериментальных данных должен по возможности давать адекватную характеристику для кривой течения в окрестности особой точки $\{ \dot{\gamma}_s, \tau_s \}$. В этой связи наиболее надежным ориентиром при выборе значения τ_s может выступить с учетом некоторого коэффициента запаса α экспериментальная точка из рассматриваемого набора данных с максимальным значением касательного напряжения

$$\tau_s = \alpha \cdot \max_{i=1}^{N} \{ \tau_i \}\ . \qquad (12)$$

Конкретное числовое значение приведенного здесь коэффициента запаса с учетом погрешности экспериментальных данных по касательному напряжению может быть принято, например, на уровне $\alpha = 1.01 \div 1.05$. Естественно, что это значение допускает корректировку по итогам проведения предварительных численных экспериментов.

5$^{\text{O}}$. Предварительные численные эксперименты показали, что при фиксированном выборе значения τ_s для заданной совокупности экспериментальных данных, зависимость средней относительной погрешности (11) от параметра q не является монотонной и при некотором значении этого параметра имеет экстремум типа минимума. Это обстоятельство предлагается далее принять за основу построения алгоритма по определению параметров реологической модели (1).

6$^{\text{O}}$. Задаемся значением параметра τ_s с учетом выражения (12), а также начальным значением q_0 параметра q. Поскольку для рассматриваемого класса рабочих сред предполагается, что $0 < n < 1$, с учетом (5) предлагается принять $q_0 = 1.25$.

Кроме этого выбираем начальное значение шага Δq для построения итерационного процесса отыскания минимума функции (11) по аргументу q. В частности в качестве значения такого начального шага предлагается принять $\Delta q = 0.1$.

И, наконец, задаемся еще одним параметром счета ε_0, который представляет собой предельно допустимую относительную погрешность определения значения функции (11) на каждом новом шаге итерационного процесса по отношению к значению той же функции, но на предыдущем шаге. В качестве значения предельной относительной погрешности, по достижению которой итерационный процесс прерывается, предлагается принять $\varepsilon_0 = 0.01$.

7$^{\text{O}}$. Принимаем

$$q^{(1)} = q_0\ .$$

Выполняя вычисления, заложенные в п. 2$^{\text{O}}$ и п. 3$^{\text{O}}$, находим набор числовых значений

$$\dot{\gamma}_s^{(1)}, \quad \tau_p^{(1)}, \quad q^{(1)}, \quad \varepsilon^{(1)}$$

параметров реологической модели $\dot{\gamma}_s$, τ_p, q (или с учетом (5) параметра n), а также средней относительной погрешности ε.

В последних выражениях и далее верхний числовой индекс (1) в круглых скобках указывает на то, что соответствующие параметры определены на предыдущем шаге итерационного процесса. Соответственно, верхним индексом (2) далее будут отмечаться значения тех же параметров, но на следующем шаге итерационного процесса.

8^{O}. Изменяем значение параметра q, полагая

$$q^{(2)} := q^{(1)} + \Delta q .$$

9^{O}. Выполняя вычисления, заложенные в п. 2^{O} и п. 3^{O}, находим набор числовых значений

$$\dot{\gamma}_s^{(2)}, \quad \tau_p^{(2)}, \quad q^{(2)}, \quad \varepsilon^{(2)}$$

параметров реологической модели $\dot{\gamma}_s$, τ_p, q (или с учетом (5) параметра n), а также средней относительной погрешности ε на новом шаге итерационного процесса.

10^{O}. Проверяем выполнение следующего условия

$$\frac{\left|\varepsilon^{(2)} - \varepsilon^{(1)}\right|}{\varepsilon^{(1)}} < \varepsilon_0 . \qquad (13)$$

Если условие (13) выполняется, то итерационный процесс считается завершенным и в качестве параметров реологической модели принимаются ранее выбранное в п. 6^{O} значение τ_s, а также

$$\dot{\gamma}_s = \dot{\gamma}_s^{(2)}; \qquad \tau_p = \tau_p^{(2)}; \qquad n = \frac{1}{q^{(2)}} .$$

Если же условие (13) не выполняется, то переходим к проверке еще одного условия.

10^{O}. Проверяем выполнение неравенства

$$\varepsilon^{(2)} < \varepsilon^{(1)} . \qquad (14)$$

Если условие (14) выполняется, то полагаем

$$\dot{\gamma}_s^{(1)} := \dot{\gamma}_s^{(2)}; \quad \tau_p^{(1)} := \tau_p^{(2)}; \quad q^{(1)} := q^{(2)}; \quad \varepsilon^{(1)} := \varepsilon^{(2)}; \quad (15)$$

и возвращаемся к выполнению п.8^{O}.

Если же условие (14) не выполняется, то полагаем

$$\Delta q := -\frac{\Delta q}{2} .$$

После этого выполняем процедуру переприсвоения значений (16) и опять же возвращаемся к выполнению п.8^{O}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

За основу была принята реологическая модель (1), в которую были предварительно заложены точные значения ее параметров

$$\tau_s^{true}, \ \tau_p^{true}, \ \dot{\gamma}_s^{true}, \ n^{true} . \qquad (16)$$

. Эти точные значения параметров были приняты за основу при генерировании случайным образом набора “псевдоэкспериментальных” данных для касательного напряжения и скорости сдвига.

Полученные по такой схеме наборы “псевдоэкспериментальных” данных с заранее заданной максимальной средней относительной погрешностью обрабатывались далее с помощью предложенного выше алгоритма с целью определения на их основе значений

$$\tau_s^{\exp}, \ \tau_p^{\exp}, \ \dot{\gamma}_s^{\exp}, \ n^{\exp} \qquad (17)$$

параметров реологической модели (1).

По результатам сравнительного анализа точных значений (16) и значений (17), полученных в ходе численных экспериментов, было показано, что рассмотренный выше алгоритм позволяет удовлетворительно определять параметры реологической модели (1). При этом погрешность получаемых результатов оказывается соизмеримой с погрешностью определения задаваемых исходных “псевдоэкспериментальных” данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Boyer F., Guazelli E., Pouliquen O. Unifing Suspensios and Granular Rheology. // Phys. Rev. Lett., 2011. V. 107. 188301. – 5 p.

2. Cwalina, C. D., and N. J. Wagner, “ Material properties of the shear-thickened state in concentrated near hard-sphere colloidal dispersions,” J. Rheol. 58, 949–967 (2014)

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. Singh A., Mari R., Denn M.M., Morris J.F. A constitutive model for simple shear of dens frictional suspensions. // J. Rheol. , 2018. V. 62. Pp. 457-468.

5. Brown, E., and H. M. Jaeger, “ Shear thickening in concentrated suspensions: Phenomenology, mechanisms and relations to jamming,” Rep. Prog. Phys., 2014. V.77, 046602.

6. 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.

7. 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.

8. Egres R.G. The rheology and microstructure of acicular precipated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition / . R.G. Egres, N.J. Wagner // 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

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

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»

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

In various technical applications, working media such as suspensions are used, which, at a sufficiently high concentration of solid phase particles, demonstrate viscosity anomalies. The essence of these anomalies lies in the fact that when the shear rate approaches a certain threshold value, the phenomenon of a sharp increase in the viscosity of the liquid is observed. At the same time, in the corresponding flow zones, the working medium begins to behave like a solid. The mechanical behavior of such a working medium can be described within the framework of a rheological model of a viscoplastic fluid, which allows for the manifestation of the effect of "hardening" or "solidification". The method of determining the parameters of such a rheological model based on the processing of experimental data on the dependence of the shear stress on the shear rate is considered. An algorithm for the implementation of this technique is proposed

Index terms: viscoplastic fluid model, "solidification" effect.

REFERENCES

1. Boyer F., Guazelli E., Pouliquen O. Unifing Suspensios and Granular Rheology. // Phys. Rev. Lett., 2011. V. 107. 188301. – 5 p.
2. Cwalina, C. D., and N. J. Wagner, " Material properties of the shear-thickened state in concentrated near hard-sphere colloidal dispersions," J. Rheol. 58, 949–967 (2014)
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. Singh A., Mari R., Denn M.M., Morris J.F. A constitutive model for simple shear of dens frictional suspensions. // J. Rheol. , 2018. V. 62. Pp. 457-468.
5. Brown, E., and H. M. Jaeger, " Shear thickening in concentrated suspensions: Phenomenology, mechanisms and relations to jamming," Rep. Prog. Phys., 2014. V.77, 046602.
6. Kolodezhnov V.N. Mathematical model of rheological behavior of viscoplastic fluid, which demonstrates the manifestation of the "hardening" effect [Text] / V.N. Kolodezhnov // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. - 2014. - № 2 (60). Pp. 55-58.
7. Kolodezhnov V.N. Method of determining the parameters of a rheological model of a viscoplastic fluid with the effect of "hardening" [Text] / V.N. Kolodezhnov, A.V. Koltakov, S.S. Kapranchikov // 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.
8. Egres R.G. The rheology and microstructure of acicular precipated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition / . R.G. Egres, N.J. Wagner // 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