

DOI: 10.15593/2224-9982/2018.53.03

УДК 62-5

**К.В. Найгерт<sup>1</sup>, В.А. Целищев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Научно-производственное предприятие «Авионика и Мехатроника», Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

## **ЧИСЛЕННОЕ ОПИСАНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЭФФЕКТОВ В РАБОЧИХ СРЕДАХ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА УПРАВЛЕНИЯ**

Непрекращающийся рост требований, предъявляемых к различным системам обеспечения летательных и космических аппаратов, заставляет искать новые конструктивные решения и совершенствовать существующие. Наиболее привлекательной темой для научных исследований в данной области являются магнито-реологические и магнито-жидкостные системы. Прежде всего это связано с их универсальностью и очевидными преимуществами эксплуатации в зонах пониженной гравитации именно магнито-реологических приводных систем. Эксплуатируемые сегодня магнито-реологические управляющие устройства в связи с конструктивными особенностями не могут работать в составе жидкостных контуров высокого давления, применение в их конструкциях запорных элементов сводит на нет все имеющиеся у магнито-реологических систем преимущества, следовательно, необходимо рассматривать альтернативные варианты, например, совершенствование методов управления магнито-реологической рабочей средой. Значительное повышение рабочих давлений легко достигается за счет комбинированных методов управления потоком жидкости в магнито-реологических системах. Помимо изменения вязкости комбинированные методы управления предусматривают также генерацию реологических и гидродинамических эффектов в рабочей среде, что расширяет не только диапазон рабочих параметров магнито-реологических систем, но и количество внешних факторов, влияющих на расходные характеристики потока магнито-реологической жидкости. Поэтому статья посвящена методике моделирования и прогнозирования свойств магнито-реологических сред во внешних энергетических полях: температурных, механических, электромагнитных. В тексте приведены примеры моделирования и расчета магнито-реологических сред, проявляющих вязкопластичные, псевдопластичные, дилатантные свойства. Контролируемая генерация подобных реологических эффектов позволяет производить комбинированное управление расходными характеристиками магнито-реологических жидкостей. Применение описанной методики способствует повышению точности численного моделирования рабочих параметров магнито-реологических приводных систем высокого давления в процессе проектирования, следовательно, и росту эффективности их эксплуатации.

**Ключевые слова:** магнито-реологическая среда, численное моделирование, неньютоновские жидкости, магнито-реологические приводы, реологические аномалии.

**K.V. Naigert<sup>1</sup>, V.A. Tselischev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> LTD « The Scientific and Production Enterprise Avionics and Mechatronics»,  
Chelyabinsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

## **THE NUMERICAL DESCRIPTION OF NON-NEWTONIAN EFFECTS IN WORKING ENVIRONMENTS OF THE MAGNETORHEOLOGICAL HIGH-PRESSURE DRIVE SYSTEMS BY COMBINED CONTROL TYPE**

Requirements for various support systems of aircraft and spacecraft are increased; this forces to seek new constructive solutions and to improve existed systems. The most attractive topics for scientific research in this field are magnetorheological and magneto-fluid systems. First of all, this is due to the fact that magnetorheological systems are universality and obvious advantages of operation in areas of low / zero gravity. Currently operated magnetorheological devices in connection with the design features do not work in the composition the high-pressure liquid circuits; the use of the locking elements in constructions nullifies all available advantages of magnetorheological systems, consequently, alternative options should be considered, for example, flow control methods of magnetorheological medias should be developed. Significant increase in operating pressures can be easily achieved by combined flow control methods of fluid in the magnetorheological systems. The combined flow control methods provide viscosity changes and generation of rheological and hydrodynamic effects in the working medias; it extends the operating range of magnetorheological systems and increases a number of external factors which are influenced on flow

rate of magnetorheological fluid. Therefore the article is devoted to the methods of modeling and forecasting the properties of magnetorheological media by external energy fields: temperature, mechanical, electromagnetic. The text contains the examples of modeling and calculation of magnetorheological medias witch exhibit viscoplastic, pseudoplastic, dilatant properties. The controllable generation of similar rheological effects allows organizing the combined management of the flow characteristics of magnetorheological fluids. The using of described methodology improves accuracy of numerical modeling of operating parameters of magnetorheological high-pressure drive systems in the design process; consequently, it enhances the efficiency of their operation.

**Keywords:** magnetorheological media, numerical simulation, non-Newtonian fluids, magnetorheological drives, rheological anomalies.

## Введение

В космической технике широкое распространение получили системы охлаждения энергетических установок, применяющие в качестве рабочих сред жидкости, проявляющие магнитные свойства. Прежде всего это связано с тем, что эксплуатация подобных систем исключает возможность регулярного сервисного обслуживания и замены элементов систем или рабочих сред. Удачный опыт использования магнито-жидкостных технологий и наличие актуальной задачи при проектировании гидравлических приводов специального назначения, применяемых в летательных аппаратах, а именно задачи повышения их надежности, долговечности и быстродействия, делают достаточно перспективным направлением исследовательской деятельности разработку новых и развитие существующих альтернативных методов управления расходными характеристиками рабочих сред приводных систем специального назначения. Одной из наиболее распространенных используемых альтернативных технологий считается магнито-реология, поэтому ее развитие в рамках аэрокосмической техники способно в значимой степени решить поставленные задачи. Также имеются подвижки в реализации различных комбинированных методов управления расходом, базирующихся на реологических эффектах, наблюдаемых в неньютоновских средах, таких как вязкопластичные, псевдопластичные, дилатантные. Применение подобных комбинированных методов способно улучшить технические характеристики систем управления / охлаждения космических аппаратов и расширить диапазон их рабочих параметров. В существующих методиках расчета, как правило, принято учитывать влияние прежде всего магнитных полей на магнито-реологическую жидкость, зачастую игнорируя возникновение в ней реологических аномалий, а также отдельно рассматривать влияние термодинамических параметров (температура и давление) на реологические свойства исследуемой среды.

Целью данного исследования является развитие методик комплексного моделирования и прогнозирования реологических аномалий в магнито-реологических жидкостях, находящихся под действием внешних энергетических полей, что позволит с большей точностью и достоверностью прогнозировать рабочие процессы систем, комбинированного управления расходом, следовательно, повысит их эффективность, долговечность и надежность, увеличив сроки безремонтной эксплуатации систем космических аппаратов.

К вязкопластичным жидкостям относятся растворы высокомолекулярных углеводородов. В подобных реологических системах энергия межмолекулярных связей достаточно высока, и для разрушения образовавшейся структуры требуется приложение значительного напряжения сдвига.

Псевдопластичные свойства характерны для растворов полимеров, иных жидких сред, молекулы которых имеют большие молекулярные массы и вытянутые структурные цепи, для обычных и коллоидных суспензий, содержащих твердые асимметричные частицы.

У псевдопластичных систем при малых скоростях сдвига молекулы переплетены друг с другом, а при достаточно больших скоростях сдвига молекулы разъединяются, уменьшая вязкость системы.

В дилатантных средах имеется жидкая фаза, количество которой достаточно для заполнения пустот между твердыми частицами только в состоянии покоя и при очень низких скоростях сдвига, при движении частиц твердой фазы с высокой скоростью относительно друг друга реологической системе требуется больший объем жидкой фазы. В процессе движения частиц

твердой фазы система в целом расширяется, увеличивая объем пространств между частицами твердой фазы. Объем жидкой фазы не хватает для увеличившегося объема пространства между частицами и недостаточно для смазки движущихся частиц твердой фазы, поэтому вязкость системы возрастает.

Дилатантными средами являются концентрированные суспензии твердых частиц.

Для описания реологических эффектов, возникающих в вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных жидкостях, можно записать следующие зависимости. В вязкопластичных жидкостях для инициации течения требуется приложить некоторое конечное напряжение, превышающее начальное сдвиговое напряжение. Вязкопластичные, псевдопластичные и дилатантные свойства среды принято описывать математическими зависимостями.

Течение вязкопластичной жидкости запишем в виде уравнения

$$\tau_{\text{сдв}} - \tau_{\text{сдв.0}} = -\eta_{\text{пл}} \frac{dv}{dz},$$

где  $\tau_{\text{сдв.0}}$  – напряжение, необходимое для начала течения жидкости;  $\eta_{\text{пл}}$  – пластическая вязкость.

Для расчета псевдопластичных и дилатантных жидкостей можно воспользоваться степенным законом, так как они не имеют предельного динамического напряжения сдвига. Численные зависимости напряжений от скоростей сдвига для псевдопластичных жидкостей нелинейны, но при высоких скоростях сдвига приближаются к линейным зависимостям. Степенной закон можно записать как

$$\tau_{\text{сдв}} = K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n,$$

где  $K, n$  – константы, характеризующие поведение движущейся неньютоновской жидкости;  $K$  – показатель консистенции – усилие сдвига – вязкость, при скорости сдвига  $1 \text{ с}^{-1}$ ;  $n$  – показатель неньютоновской жидкости – величина отклонения от ньютоновского поведения.

Более уточненное выражение, описывающее степенной закон, выглядит так:

$$\tau_{\text{сдв}} = K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} \frac{dv}{dz}.$$

Очевидно, что кажущаяся вязкость зависит не только от градиента скорости, но и от численного значения показателя  $n$ . Псевдопластичная среда при  $n < 1$   $K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1}$ .

Эффективная вязкость псевдопластичной среды снижается с увеличением скорости сдвига. Дилатантная среда при  $n > 1$   $K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1}$ .

Эффективная вязкость дилатантной среды повышается с увеличением скорости сдвига.

Для псевдопластичных жидкостей, чем меньше  $n$ , тем более псевдопластична среда, чем больше значение  $K$ , тем больше несущая способность раствора, а для дилатантных жидкостей чем больше  $n$ , тем более дилатантна среда. Для описания реологических аномалий, возникающих в вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных рабочих средах магнитореологических приводных систем, необходимо учитывать специфику рабочего процесса и динамику силовых полей [1–5].

### Методика исследования

Известно, что воздействие внешнего магнитного поля позволяет создавать эффект появления псевдопластичных и даже вязкопластичных свойств магнитореологических сред. Изначально в слабых магнитных полях магнитореологическая жидкость обладает псевдопластич-

ными свойствами, но при росте параметров магнитного поля в достаточно сильных магнитных полях свойства магнитореологической жидкости фактически переходят в вязкопластичные свойства. Поскольку для вязкопластичных жидкостей характерны высокие начальные напряжения сдвига и запас прочности на сдвиг достаточно большой, динамическая вязкость гипотетически стремится к бесконечности.

Также очевидна зависимость вязкостных характеристик жидкой среды от температуры, а применение температурного поля (моделирование вязкостных характеристик рабочей среды посредством задания требуемых температурных параметров) до регулирования реологических характеристик магнитореологической среды приводит к большей выраженности неньютоновских эффектов, генерируемых в среде.

Запишем вязкость во внешнем магнитном поле как

$$\eta^* = \eta_c + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{(\tau \tau_s H M(H)) / J}$$

или с учетом сдвиговых напряжений перепишем уравнение как

$$\eta^* = \left( \frac{\tau_{сдв}}{\dot{\gamma}} + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{(\tau \tau_s H M(H)) / J},$$

где  $J$  – суммарный момент инерции частиц;  $\tau_s$  – времена релаксации (немагнитных и магнитных частиц);  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\eta_c$  – коэффициент сдвиговой вязкости;  $\dot{\gamma}$  – градиент скорости, нормален к направлению движения;  $\eta_p$  – реологическая вязкость без проявления неньютоновских свойств до помещения в энергетические поля [6–7].

Очевидно, что значение слагаемого  $\frac{\tau_{сдв}}{\dot{\gamma}}$ , характеризующего сдвиговые воздействия механических полей, по мере уменьшения значения  $\tau_{сдв}$  начинает стремиться к нулю, а при принятии  $\tau_{сдв}$  значения «ноль» слагаемое  $\frac{\tau_{сдв}}{\dot{\gamma}}$  обращается в ноль.

Намагниченность вещества под действием магнитного поля

$$M = \left( \frac{B}{\mu_a} \right) - H,$$

$B$  – магнитная индукция.

При расчете времени релаксации частиц жидкости носителя берем значение времени релаксации немагнитной частицы с самой большой молекулярной цепью.

Магнитная проницаемость среды

$$\mu_a = \frac{B}{H}.$$

Комплексная магнитная проницаемость среды

$$\mu_{комп} = \mu_a(H) e^{-j\psi},$$

$\psi$  – фаза [8].

Принимая во внимание неоднородность частиц формы частиц магнетика и частиц жидкости носителя, примем форму частиц сферической, а форму частиц жидкости носителя как длинные молекулярные цепи.

Суммарный момент инерции частиц сферической формы

$$J = \frac{2}{5} \rho r^2 V,$$

$\rho$  – плотность;  $r$  – радиус;  $V$  – объем.

Суммарный момент инерции длинных молекулярных цепей

$$J = \frac{1}{12} \rho l^2 V,$$

$l$  – длина.

При расчете необходимо учитывать соотношение частиц магнетика и частиц жидкости носителя в рабочей среде:

$$J = \left( N_x \frac{2}{5} \rho r^2 V + N_y \frac{1}{12} \rho l^2 V \right) n N_A,$$

где  $N_x$ ,  $N_y$  – доли частиц;  $N_A$  – число Авогадро;  $n$  – количество вещества.

Касательное напряжение исходя из модели Шведова–Бингама [2, 5]

$$\tau_{сдв} = \tau_{сдв.0} + \eta \frac{dv}{dz}.$$

Для расчета реологических аномалий в магнитореологической среде

$$\eta^* = \left( \frac{\tau_{сдв.0} + \eta \frac{dv}{dz}}{\dot{\gamma}} + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{(\tau \tau_s HM(H)) / J}$$

или

$$\eta^* = \left( \left( \frac{\tau_{сдв.0}}{\frac{dv}{dz}} + \eta \right) + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J}.$$

Для магнитореологических жидкостей, проявляющих изначально псевдопластичные свойства, в которых значения напряжений возникают при высоких скоростях сдвига, справедливо полученное выше выражение, так как при экстраполяции до оси ординат очевидно проявление как бы вязкопластичных свойств и наличие предельного динамического напряжения сдвига.

Как было отмечено выше, слагаемое  $\tau_{сдв.0} / \frac{dv}{dz}$  вносит ощутимый вклад в изменение вязкости только при достаточно высоких значениях  $\tau_{сдв.0}$  – начальных сдвиговых напряжений.

Для степенного закона в общем виде

$$\eta^* = \left( \frac{K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\dot{\gamma}} + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J}.$$

В уточненном виде для степенного закона

$$\eta^* = \left( K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J}.$$

Как было отмечено, магнитореологическая среда в сильных внешних магнитных полях проявляет вязкопластичные свойства. В случае применения магнитореологической рабочей жидкости, обладающей дилатантными свойствами необходимо учесть эффекты повышения вязкости в подобных средах с ростом значений механических напряжений. Значения коэффициента  $K$  зависят от физико-химических свойств среды и термодинамических параметров, поэтому его принято определять экспериментально. Для магнитореологических жидкостей, проявляющих неявные дилатантные свойства, значения коэффициента  $K$  невелики, следовательно, о существенном вкладе в изменения вязкости магнитореологической среды слагаемого  $K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1}$  можно говорить только при условиях появления в ней упорядоченной структуры, то есть в достаточно сильных внешних магнитных полях. Для учета реологических особенностей в достаточно сильных внешних магнитных полях магнитореологической жидкости, проявляющей изначально дилатантные свойства, запишем уравнение

$$\eta^* = \left( \left( K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} + \eta \right) + \eta_p \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J}.$$

Описанное выше выражение целесообразно применять и для расчета реологических эффектов в достаточно сильных внешних магнитных полях магнитореологических сред, проявляющих изначально псевдопластичные свойства.

Принимая во внимание псевдопластичные и вязкопластичные свойства магнитореологической жидкости во внешних магнитных полях и то, что их атомарная решетка при образовании структурированной молекулярной системы в магнитореологической системе не имеет кристаллической структуры, не обладает дальним порядком в расположении атомов и молекул и что существует зависимость вязкости от температуры, опишем реологические свойства, введя понятие аморфная вязкость [2].

$$\eta(T^0) = A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right),$$

где  $A^0$  – коэффициент;  $Q$  – энергия активации;  $R$  – газовая постоянная;  $T^0$  – температура.

Также справедливо следующее:

$$\eta_p = \eta \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right);$$

$$\eta^* = \left( \left( \frac{\tau_{сдв,0}}{\frac{dv}{dz}} + \left( A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \right) \right) + \eta \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \frac{K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\dot{\gamma}} + A^0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J}.$$

При ярко выраженных дилатантных свойствах магнитореологической среды

$$\eta^* = \left( \frac{K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\dot{\gamma}} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s HM(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \left( K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} + \left( A^0 \cdot \exp \left( \frac{Q}{RT^0} \right) \right) \right) + \eta \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J}.$$

Значение коэффициента  $A^0$  зависит также от физико-химических свойств среды и термодинамических параметров, определяют его значения, как правило, экспериментально. Реальный вклад оказывает слагаемое  $A^0 \cdot \exp \left( \frac{Q}{RT^0} \right)$  только в достаточно сильных внешних магнитных полях, когда магнито-реологическая среда приобретает структуру и имеет смысл вести речь об аморфной вязкости, а коэффициент  $A^0$  принимает высокие значения. В случае четкого структурирования сред вязкость, описываемая слагаемым  $A^0 \cdot \exp \left( \frac{Q}{RT^0} \right)$ , будет иметь преобладающее значение. При умеренных внешних магнитных полях значения коэффициента  $A^0$  невелики, а при снятии магнитного поля его значение стремится к нулю. Сам компонент слагаемого  $\exp \left( \frac{Q}{RT^0} \right)$  позволяет оценивать влияние температуры на вязкость и может применяться при оценке влияния на вязкость низких температур, близких к температурам фазового перехода.

Также в некоторых случаях при воздействии достаточно сильных внешних магнитных полей на магнито-реологическую среду, когда происходит четкое структурирование объема магнито-реологической жидкости и позиционирование его в пространстве, можно говорить о проявлении магнито-реологической средой вязкоупругих свойств. Поэтому применимо следующее выражение:

$$\eta^* = \left( \frac{\tau_{сдв.0} + K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\dot{\gamma}} \exp \left( \frac{Q}{RT^0} \right) \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J}.$$

Зависимость изменения вязкости от давления можно представить как

$$\eta = \mu_k \frac{k_{cp} M}{N_A \sum \Delta V_i},$$

где  $\Delta V_i$  – вандерваальсов объем;  $M$  – молярная масса;  $\mu_k$  – кинематическая вязкость.

Коэффициент упаковки молекулярных цепей

$$k_{cp} = \frac{N_A \sum \Delta V_i}{M/\rho}.$$

Поэтому вышеприведенные расчетные зависимости для вязкопластичных, дилатантных, псевдопластичных и вязкоупругих сред запишем в виде

$$\eta^* = \left( \left( \frac{\tau_{сдв.0}}{\frac{dv}{dz}} + \eta_{рел.ан} \right) + \mu_k \frac{k_{cp} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \frac{K \left( \frac{dv}{dz} \right)}{\dot{\gamma}} \cdot \frac{k_{cp} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \left( K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} + \eta_{\text{рел.ан}} \right) + \mu_k \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \frac{\tau_{\text{сдв.0}} + K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\dot{\gamma}} \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J}.$$

Слагаемое  $\mu_k \cdot \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i}$  и компонент слагаемого  $\frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i}$  позволяют оценивать влияние на вязкость нормальных механических полей давления, за счет оценки изменения значений  $\Delta V_i$  – вандерваальсовых объемов молекулярных цепей [9–13].

Также в инженерной практике для решения общих задач возможно применение следующих выражений:

$$\eta^* = \left( \left( \frac{\tau_{\text{сдв.0}}}{\frac{dv}{dz}} + A^{0/p} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \right) + \mu_k \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \left( K \left( \frac{dv}{dz} \right)^{n-1} + A^{0/p} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \right) + \mu_k \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J};$$

$$\eta^* = \left( \frac{\tau_{\text{сдв.0}} + K \left( \frac{dv}{dz} \right)^n}{\frac{dv}{dz}} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT^0}\right) \frac{k_{\text{cp}} M}{N_A \sum \Delta V_i} \right) + \frac{1}{4} \frac{\tau M(H)}{1 + (\tau \tau_s H M(H)) / J}.$$

$A^{0/p}$  – с учетом давления в рассматриваемой среде.

Необходимо учитывать законы изменения значений некоторых физических параметров: наличие предельных значений вязкости, после достижения которых можно уже говорить о начале фазового перехода и прекращении процесса течения среды, магнитные свойства веществ, такие как магнитная проницаемость среды, комплексная магнитная проницаемость, которым свойственно иметь эффекты насыщения. Также стоит рассмотреть и нелинейности взаимных корреляций значений ряда физических параметров и зависимость некоторых из них от характеристик внешних механических, магнитных, электрических полей, например зависимость касательного напряжения от градиента скорости сдвига, зависимость электромагнитного давления от силы Лоренца, зависимость времени релаксации частиц магнитореологической жидкости от параметров внешнего магнитного поля. Для данных физических эффектов и взаимно коррелирующих физических величин требуется проведение итерационных процессов или процессов интегрирования и дифференцирования по некоторым параметрам [14–20].

### Результаты численного эксперимента

На основе вышеописанных моделей получены расчетные зависимости (рис. 1–6) для образцов различного состава, проявляющих вязкопластичные, дилатантные, псевдопластичные свойства, с начальной вязкостью (вязкостью вне энергетических полей) от единиц до десятков Ст.



$z$  – сдвиг; см,  $v$  – скорость, см/с;  $\frac{dv}{dz}$  – градиент скорости сдвига;  $eAn$  – напряжение сдвига, Н/см<sup>2</sup>;  $qM$  – вязкость в температурном и механических полях, Ст;  $qH$  – вязкость в магнитном поле, Ст.

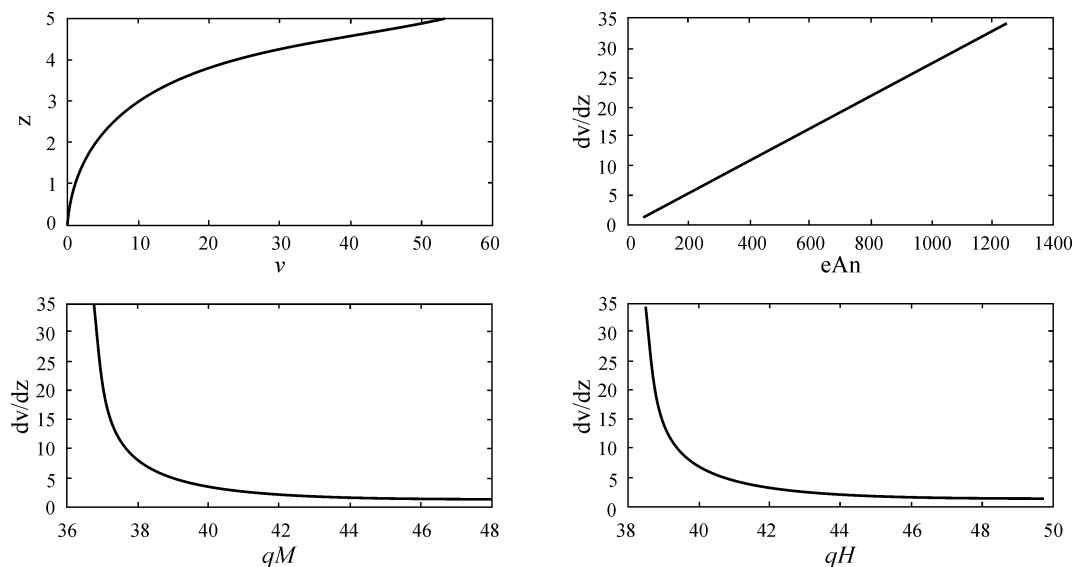


Рис. 1. Расчетные зависимости вязкопластичной магнитореологической среды

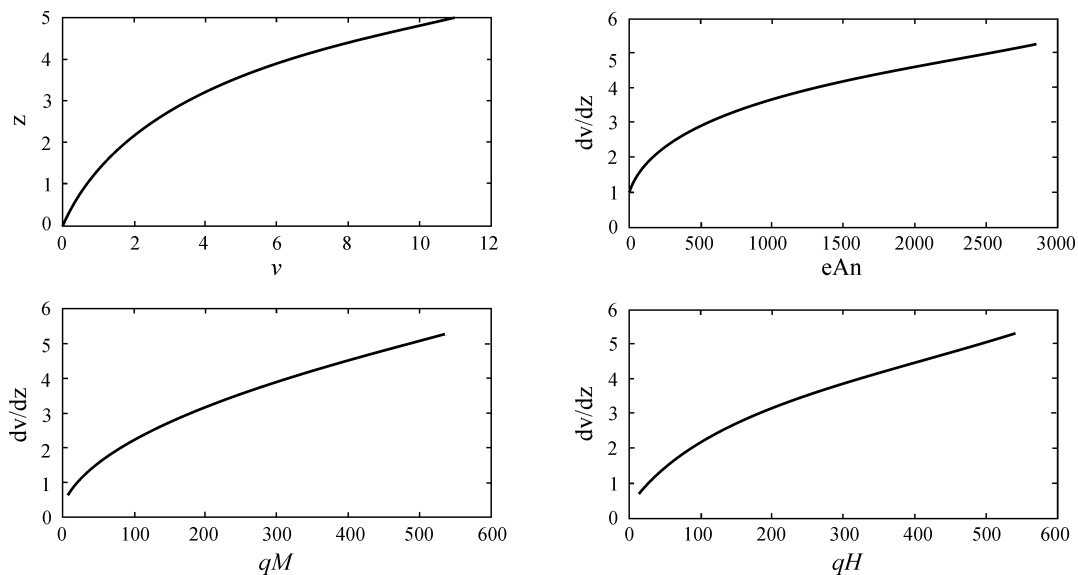


Рис. 2. Расчетные зависимости дилатантной магнитореологической среды

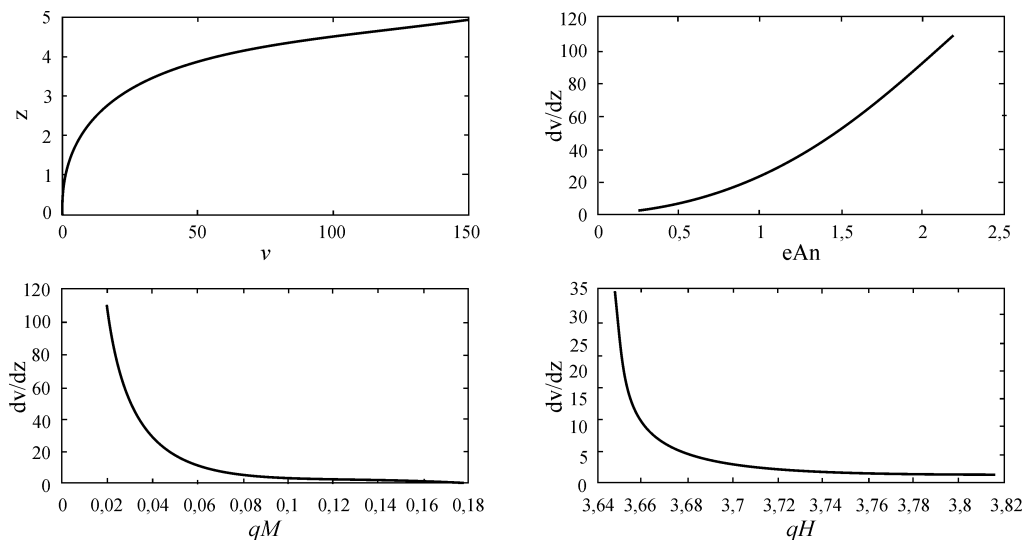


Рис. 3. Расчетные зависимости псевдопластичной магнитоореологической среды

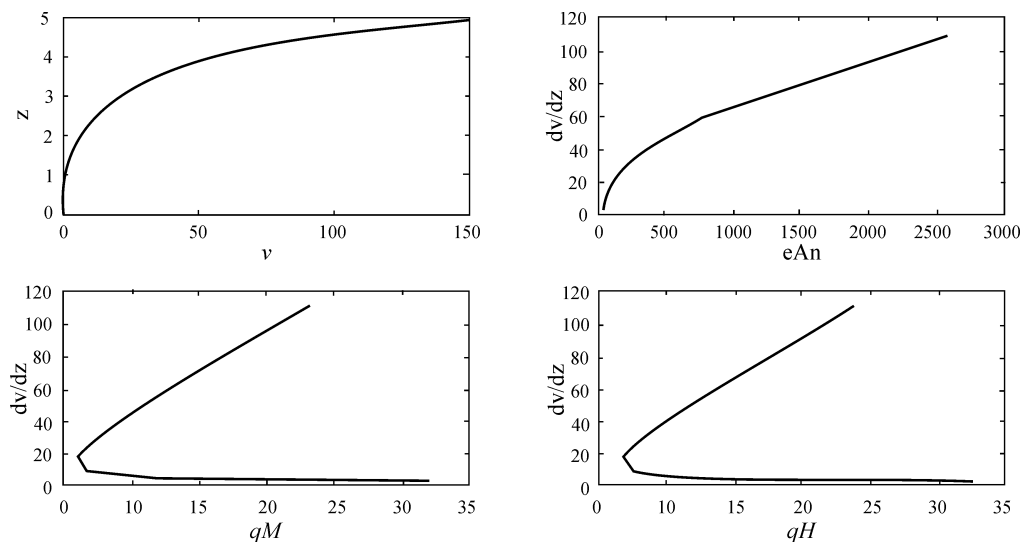


Рис. 4. Расчетные зависимости нелинейно вязкопластичной магнитоореологической среды

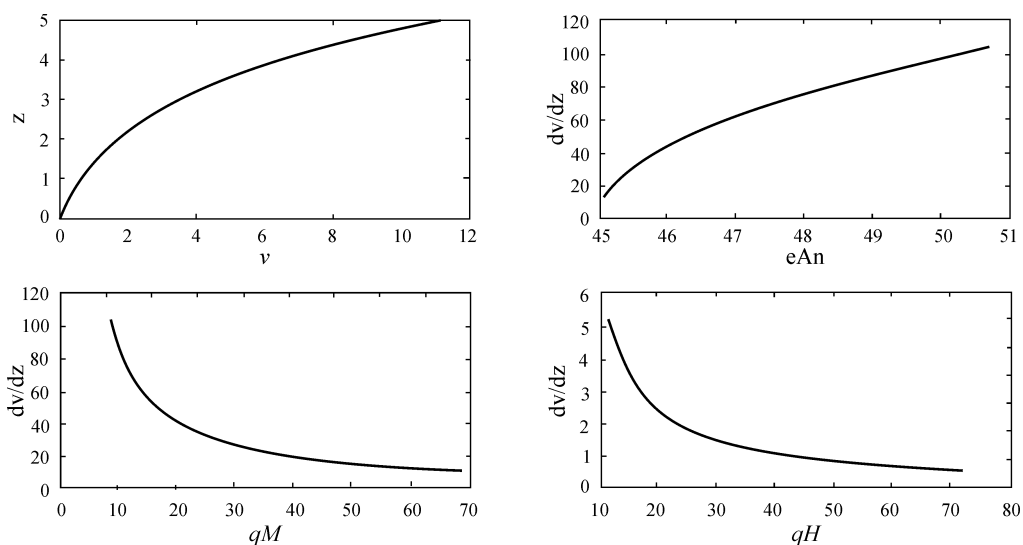


Рис. 5. Расчетные зависимости нелинейно-вязкопластичной магнитоореологической среды

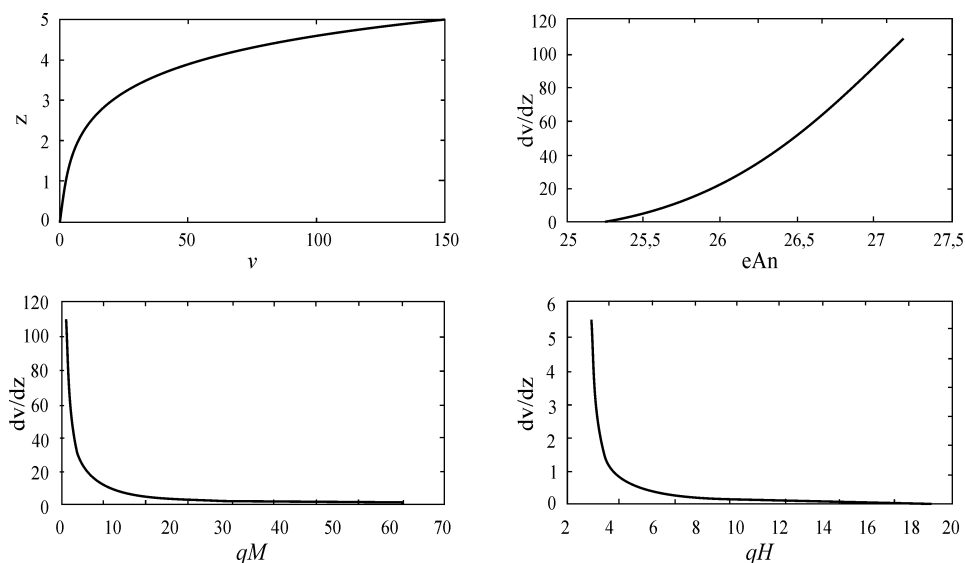


Рис. 6. Расчетные зависимости нелинейно-вязкопластичной магнитореологической среды

Представленные графические зависимости (см. рис. 1–6) иллюстрируют закономерное повышение вязкости магнитореологической среды во внешнем магнитном поле. Также очевидно соблюдение характера зависимости реологических параметров для вязкопластичных, псевдопластичных и дилатантных сред. Численная модель позволяет учитывать явления вязкопластичности и анализировать возникновение эффектов дилатантности или псевдопластичности различной степени выраженности в магнитореологических средах. Графические зависимости (см. рис. 4) показывают способность численной модели описывать пластическое течение и прочие нелинейности вязкопластичных реологических эффектов. Полученные графические зависимости свидетельствуют о значительно большем вкладе неньютоновских реологических эффектов в изменение вязкости магнитореологических сред в сравнении с вкладом внешних магнитных полей со средними силовыми характеристиками.

### Выводы

Приведенная математическая модель описывает возникающие неньютоновские эффекты в магнитореологических рабочих средах в процессе их эксплуатации с достаточно высокой достоверностью и применима для магнитореологических рабочих жидкостей, проявляющих начальные вязкопластичные, псевдопластичные и дилатантные свойства.

Модель позволяет прогнозировать нелинейности реологических аномалий, возникающих в вязкопластичных средах, и определять их численные значения с высокой точностью. Численные зависимости дают возможность прогнозировать и моделировать неньютоновские эффекты, позволяющие регулировать расход магнитореологической рабочей среды в широком интервале рабочих температур и давлений. Разработанная численная модель дает достоверные результаты в широком диапазоне вязкостей магнитореологических сред.

### Библиографический список

1. Мотавкин А.В., Покровский Е.М., Скородумов В.Ф. Определение реологических параметров полимерных композитов // Высокомолекулярные соединения. – 2005. – Т. А47, № 9. – С. 1728–1734.
2. Яхно О.М., Дубовицкий В.Ф. Основы реологии полимеров. – Киев: Виц. шк., 1976. – 185 с.
3. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
4. Ronald G. Larson. The Structure and Rheology of Complex Fluids. – NY: Oxford University Press, 1999. – 682 p.
5. Фройштетер Г.Б., Данилевич С.Ю., Радионова Н.В. Течение и теплообмен неньютоновских жидкостей в трубах. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

6. Shliomis M.I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation // *Sov. Phys., JETP* 24. – 1967. – No. 1. – С. 173–177.
7. Shliomis. M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions // *Sov. Phys., JETP* 34. – 1972. – No. 6. – С. 1291–1294.
8. Смык А.Ф. Физика: курс лекций. – М.: Изд-во МАДИ, 2016. – 293 с.
9. Найгерт К.В., Редников С.Н. Автоматизация рабочего процесса магнитореологического дросселирующего устройства // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 23–32. DOI: 10.14529/engin160203
10. Найгерт К.В., Редников С.Н. Технологии управления расходными характеристиками потока посредством изменения реологических свойств рабочих сред // *Вестн. ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 52–60. DOI: 10.14529/engin160206
11. Найгерт К.В., Редников С.Н., Япарова Н.М. Процессы полимеризации рабочей среды в зазорах золотниковых пар // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2016. – № 46. – С. 172–190. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.10
12. Редников С.Н., Найгерт К.В., Прокудина Л.А. Методика расчета адсорбционных процессов в малых зазорах проточной части приводов высокого давления // *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 21–32.
13. Аскадский А.А., Кондрашенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. – М.: Научный мир, 1999. – 544 с.
14. Бриджмен П.В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: пер. с англ. – М.: Мир, 1955. – 467 с.
15. Атанов Ю.А. Релаксация электрической поляризации в вязкотекучих полиметилсилоксанах до давлений 11 кбар // *ЖВС. Краткие сообщения*. – 1970. – № 3 – С. 224–226.
16. Nelson Y. Dzade, Alberto Roldan, Nora H. de Leeuw. A Density Functional Theory Study of the Adsorption of Benzene on Hematite ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) Surfaces // *J. Minerals*. – 2014. – Vol. 4 – P. 89–115. DOI: 10.3390/min4010089
17. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2001. – 448 с.
18. Виноградов Н.В., Виноградов Ю.Н. Как самому рассчитать и сделать электродвигатель. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
19. Котур В.И., Скомская М.А., Храмова Н.Н. Электрические измерения и электрические приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
20. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2014. – 318 с.

### References

1. Motavkin A.V., Pokrovsky E.M., Skorodumov V.F. Opredeleniye reologicheskikh parametrov polimernykh kompozitov [The determination of rheological parameters of polymer composites]. *Polymer Science, Series A: Chemistry, Physics*, 2005, Vol. A47, No. 9, pp. 1728–1734.
2. Yakhno O.M., Dubovitskiy V.F. Osnovy reologii polimerov [Rheological fundamentals of polymers]. Kiev: Vishchaya shkola, 1976, 185 p.
3. Wilkinson W. L. Nenyutonovskiye zhidkosti [Non-Newtonian Fluids]. Moscow: Mir, 1964, 216 p.
4. Ronald G. Larson. The Structure and Rheology of Complex Fluids. NY: Oxford University Press, 1999, 682 p.
5. Frayshteter G.B. Danilevich S.Yu., Rodionova N.V. Techeniye i teploobmen nenyutonovskikh zhidkostey v trubakh [Flow and heat transfer of non-Newtonian fluids in the pipes]. Kiev: Naukova dumka, 1990, 216 p.
6. Shliomis M. I. Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation. *Sov. Phys., JETP* 24, No. 1, 1967, pp. 173-177.
7. Shliomis M.I. Effective viscosity of magnetic suspensions. *Sov. Phys., JETP* 34, No. 6, 1972, pp. 1291-1294.
8. Smyk A.F. Fizika. Kurs lektsey [Physics. Course of lectures]. Moscow: MADI, 2016, 293 p.
9. Naigert K.V., Rednikov S.N. Avtomatizatsiya rabocheho protsessa magnitореологического дросселирующего ustroystva [The workflow automation system for magnetorheological control device].

*Bulletin of the South Ural State University. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23-32. DOI: 10.14529/engin160203

10. Naigert K.V., Rednikov S.N. Tekhnologii upravleniya raskhodnymi kharakteristikami potoka posredstvom izmeneniya reologicheskikh svoystv rabochikh sred. [The technologies of the management of flow characteristics by modifying the rheological properties of the working environment]. *Bulletin of the South Ural State University. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 52-60. DOI: 10.14529/engin160206

11. Naigert K.V., Rednikov S.N., Yaparova N.M. Protsessy polimerizatsii rabochey sredy v zazorakh zolotnikovyykh par [The processes of polymerization of working fluid in the gaps of hydraulic spool couples]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*, 2016, no. 46, pp. 172-190. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.10

12. Rednikov S.N., Naigert K.V., Prokudina L.A. Metodika rascheta adsorbtsionnykh protsessov v malykh zazorakh protochnoy chasti privodov vysokogo davleniya [The Method of Calculation for the Adsorbed Process in the Small Gaps of a Liquid End of High Pressure Hydraulic Actuators]. *Bulletin of the South Ural State University. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 21-32. DOI: 10.14529/engin170103

13. Askadskiy A.A., Kondrashenko V.I. Kompyuternoe materialovedenie polimerov. T. 1. Atomno-molekulyarnyy uroven [Computational materials engineering for polymers. Vol. 1. Atomic-molecular level]. Moscow: Nauchnyy mir, 1999, vol. 1, 544 p.

14. Bridzhmen P.V. Issledovaniya bolshikh plasticheskikh deformatsiy i razryva [The study of large plastic deformations and rupture]. Moscow: Mir, 1955. 467 p.

15. Atanov Yu.A. Relaksatsiya elektricheskoy polyarizatsii v vyazkotechicheskikh polimetilsiloksanakh do davleniy 11 kbar [The relaxation of the electric polarization of the plastic polymethyl at a pressure up to 11 kbar]. ZHVS. Kratkiye soobshcheniya, 1970, no. 3, pp. 224-226.

16. Nelson Y. Dzade, Alberto Roldan, Nora H. de Leeuw. A Density Functional Theory Study of the Adsorption of Benzene on Hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Surfaces. *Journal: Minerals*, 2014, Vol. 4, pp. 89-115. DOI: 10.3390/min4010089

17. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. Matematicheskiye modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentsi vo vnutrennikh techeniyakh [Mathematical Models of Inhomogeneous Anisotropic Turbulence in the Internal Flows]. Tomsk, Tomsk State University Publishing, 2001, 448 p.

18. Vinogradov N.V., Vinogradov Yu.N. Kak samomu rasschitat i sdelat elektrodvigatel [How to Calculate and to Make Motor]. Moscow: Energiya, 1974, 168 p.

19. Kotur V.I. Elektricheskkiye izmereniya i elektricheskkiye pribory [Electrical Measurements and Electrical Appliances]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 400 p.

20. Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoye pole [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electromagnetic field]. Moscow: Yurayt, 2014, 318 p.

#### Об авторах

**Найгерт Катарина Валерьевна** (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственного предприятия «Авионика и мехатроника» (454084, Челябинск, ул. Калинина, д. 16, e-mail: kathy\_naigert@mail.ru).

**Целищев Владимир Александрович** (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная гидромеханика» ФГБОУ ВО УГАТУ (450008, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).

#### About the authors

**Katharina V. Naigert** (Chelyabinsk, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific and Production Enterprise “Avionics and Mechatronics” (16, Kalinina st., Chelyabinsk, 454084, Russian Federation, e-mail: kathy\_naigert@mail.ru).

**Vladimir A. Tselischev** (Ufa, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Applied Hydromechanics, Ufa State Aviation Technical University (11, K. Marksa st., Ufa, 450008, Russian Federation, e-mail: pgl.ugatu@mail.ru).