

УДК 532.1

С.Н. Редников, К.В. Найгерт

Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия

**ЗАВИСИМОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ
ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ УГЛЕВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЫ
ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦЫ ПРИ СНЯТИИ ВЯЗКОСТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ В РОТАЦИОННОМ
ВИСКОЗИМЕТРЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Рассматриваются характерные особенности вязкостных характеристик жидкостей при проведении замеров их вязкости в ротационных вискозиметрах. Описываются основные физические явления, протекающие в образцах технических жидкостей при воздействии на них внешних силовых полей. Приводятся тарировочные графики ротационного вискозиметра высокого давления, проводится оценка полученных результатов измерений и их погрешностей. Дается описание типичных инструментальных погрешностей измерений для ротационных вискозиметров и устанавливается влияние различных факторов, как внешних, так и внутренних, на величину данной погрешности. Особое внимание уделяется определению изменений кинетической энергии системы и методам моделирования условий изучения энергетических процессов, протекающих в жидкой среде, а также применению математического аппарата для их описания. Рассматривается влияние режимов работы измерительной системы на энергетические процессы системы и на результаты измерений. Приводится методика описания зависимости внутренней энергии системы от размера частиц и, следовательно, зависимости теплогидравлических свойств жидкостей от дисперсности системы. Описанная методика дает возможность учесть ряд факторов, оказывающих влияние на реологические свойства исследуемой среды, и повысить достоверность результатов измерений для определения динамической вязкости, получаемых при использовании ротационных вискозиметров.

Ключевые слова: вязкость, ротационный вискозиметр, измерительная система Серле, неньютоновские жидкости, пограничный слой, дисперсность системы, кинетическая энергия жидкости, провал вязкости, диссипативные силы, коэффициент диффузии, время релаксации анизотропии.

S.N. Rednikov, K.V. Naigert

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**DEPENDENCY OF INTERNAL ENERGY
OF ONE-COMPONENT HYDROCARBON SYSTEM
ON THE PARTICLE SIZE WHEN READING THE VISCOSITY
CHARACTERISTICS IN HIGH-PRESSURE ROTATIONAL
VISCOMETER**

The paper discusses the characteristics of the viscosity of liquids during the measurement of viscosity in rotary viscometers. It is described the basic physical phenomena occurring in the samples of fluids under the influence of external force fields. Authors give the calibration curves of high-pressure rotational viscometer, an evaluation of the results of measurements and their errors. A description of typical instrumental error of measurements for rotary viscometers is given and the influence of various external and internal factors on magnitude of this error is established. Special attention is paid to the definition of the changes of kinetic energy of the system and to the methods of simulating of conditions of energy processes occurring in the liquid medium and application of the mathematics to describe them. It is considered the influence of working regime of measuring system on the energy processes and measurement results. It is given the technique of definition of internal energy of system depending on particles sizes and dependency of thermal-hydraulic properties of liquids depending on the dispersity of the system. Described technique enables to take into account the factors influencing on rheological properties of investigated medium and to improve the veracity of measurement results obtained when determining the dynamic viscosity of rotational viscometers.

Keywords: viscosity, rotational viscometer, Serle measuring system, non-Newtonian fluids, boundary layer, dispersion of system, kinetic energy of fluid, failure of viscosity, dissipative forces, diffusion coefficient, anisotropy relaxation time.

Из всех теплогидравлических свойств технических жидкостей особым практическим значением обладает вязкость. Именно вязкостные характеристики транспортируемой жидкой среды во многом определяют поиск рациональных технических решений при проектировке трубопроводов и разработке гидроаппаратуры. Правильно подобранные рабочие жидкости, являясь кинетическим звеном гидравлической системы, оказывают значительное положительное влияние на ее технические характеристики. Если для ньютоновских жидкостей вязкость – величина постоянная, то для неньютоновских жидкостей, к которым относятся многие технические жидкости, вязкость зависит от напряжения сдвига и изменяется во времени, что требует экспериментального определения ее численного значения для каждого частного случая. Для этих целей широко применяются различные типы вискозиметров,

наиболее распространенными из которых на данный момент стали капиллярные и ротационные. В рамках наших исследований мы применяем ротационный вискозиметр с измерительной системой Серле. Конструктивной особенностью реометров, основанных на принципе Серле, с измерительной системой типа «коаксиальные цилиндры» является то, что внутренний цилиндр – ротор – вращается, приводясь в движение двигателем, а внешний цилиндр – стакан – остается неподвижен [1]. Данная конструкция изображена на рис. 1. Движение ротора приводит к течению жидкости, находящаяся в кольцевом зазоре между внутренним и внешним цилиндрами. Жидкость в кольцевом зазоре оказывает сопротивление сдвигу, что приводит к возникновению крутящего момента на внутреннем цилиндре измерительной системы. Возникший крутящий момент зависит от вязкости испытуемой жидкости и противоположно направлен крутящему моменту двигателя. Датчик крутящего момента и привод ротора связаны одной осью, что является основой принципа Серле. Приняв для измерительной системы очень малую величину кольцевого зазора, рассматривать течение исследуемой жидкости целесообразно с использованием методов расчета пограничного слоя.

Понятие пограничного слоя впервые ввел Прандтль, исходя из экспериментальных данных. На основе собственных наблюдений он установил для большого диапазона чисел Рейнольдса, что вблизи тонкой стенки имеется тонкий слой, вязкие эффекты в котором так же существенны, как и инерционные. Придя к выводу, что можно использовать упрощенные уравнения при соблюдении несколь-

ких условий, он установил соотношения толщины вязкого слоя δ с размером тела L вдоль по потоку как $\delta / L \ll 1$, а главный вязкий член и любой инерционный должны иметь один порядок. Оценка по порядку величины привела к уменьшению количества основных уравнений, а применяя допущения в расчетах, на практике можно пренебрегать вторыми производными скоростей в продольном направлении по сравнению с соответствующими производными в поперечном направлении

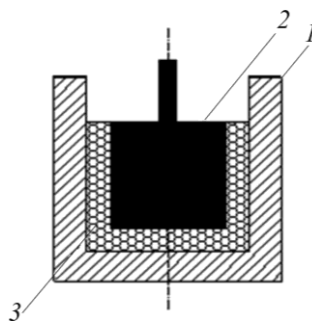


Рис. 1. Реометр Серле: 1 – стакан; 2 – ротор; 3 – исследуемый образец

и вообще не рассматривать уравнения движения в поперечном направлении. На сегодняшний день применение данного упрощения допустимо для всех течений, в которых возможно выделить преимущественное направление, а сам термин «пограничный слой» можно отнести к условиям, позволяющим вообще не рассматривать уравнения движения в поперечном направлении и в оставшихся уравнениях пренебречь членом со второй производной в продольном направлении. Подобный подход позволяет решать ряд инженерных задач, но делает невозможным рассмотрение внутренних энергетических процессов системы, так как не включает в математическое описание процесса кинетическую энергию, являющуюся квадратичной функцией скорости. Как известно, дисперсность системы во многом определяет ее реологические свойства, поэтому, изучая зависимость вязкостных аномалий жидкости от качественного состава, нельзя не учитывать внутреннюю энергию системы, обусловленную движением молекул исследуемого вещества.

Если подробно рассматривать процесс течения неньютоновских жидкостей, обладающих структурной вязкостью, в кольцевом зазоре, необходимо принять во внимания ряд факторов, которые не позволяют применять упрощенные методы расчетов, например, при рассмотрении вращающихся течений, вызываемых вынужденными вихрями, в которых значение завихренности Ω отлично от нуля [2] и находится как ротор вектора скорости:

$$\Omega = \text{rot } \vec{v}. \quad (1)$$

Подобные вращающиеся потоки обладают окружной скоростью v_φ , значение которой равно нулю только на оси симметрии, а максимальное значение окружной скорости, необходимой для образования полностью вынужденного вихря, потоки приобретают на внешней границе омываемого канала:

$$v_\varphi = c'r, \quad (2)$$

где c' – скорость движения жидкости; r – радиус кольцевого зазора.

Окружной скорости вблизи его внутренней поверхности достаточно лишь для ограниченных течений [2, 3].

Также в условиях, когда тепловыделение происходит значительно быстрее, чем способно рассеиваться во внешнюю среду, возникает

явление локального нагрева тестируемой пробы, а именно рост кинетической энергии системы, сопровождающийся повышением температуры исследуемой среды, как результат возникшего сдвигаемого тепловыделения с образованием зоны повышенных скоростей.

Явление нагрева тестируемой пробы хорошо иллюстрируют представленные ниже кривые течения, полученные при тарировке оборудования. Нами были проведены измерения вязкости воды в интервале давлений от 1 до 3000 атм, в ротационном вискозиметре высокого давления без учета инструментальной погрешности. Экспериментально полученные графические зависимости (рис. 2–5, кривые 2) отличаются от аналогичных зависимостей вязкости от давления [4, 5], построенных по результатам измерений воды в капиллярном вискозиметре (кривые 1). После сравнения графических зависимостей, измерений вязкости воды в капиллярном вискозиметре и измерений вязкости воды в ротационном вискозиметре очевидно, что при измерениях в ротационном вискозиметре наблюдается провал вязкости, так как энергия, необходимая для поддержания течения в кольцевом зазоре ротационного вискозиметра, в конечном итоге превращается в теплоту. Также становится очевидной зависимость увеличения провала вязкости исследуемого вещества от факторов, влияющих на изменение кинетической энергии: температуры и скорости сдвига.

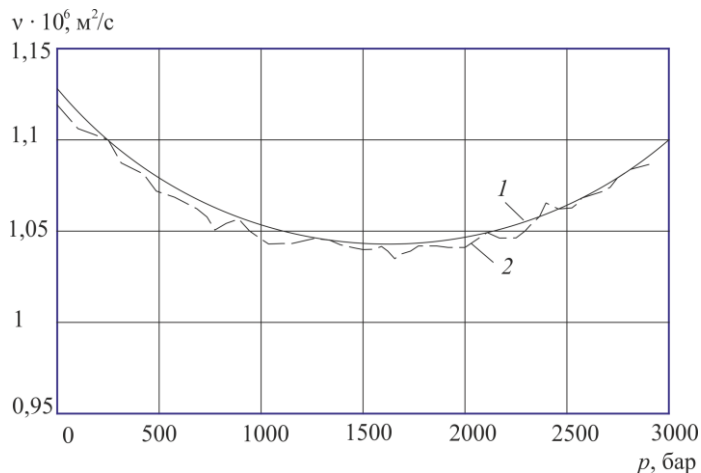


Рис. 2. Зависимости вязкости воды от давления при температуре 10 °С и частоте вращения ротора 1000 об/мин: 1 – капиллярный вискозиметр; 2 – ротационный вискозиметр

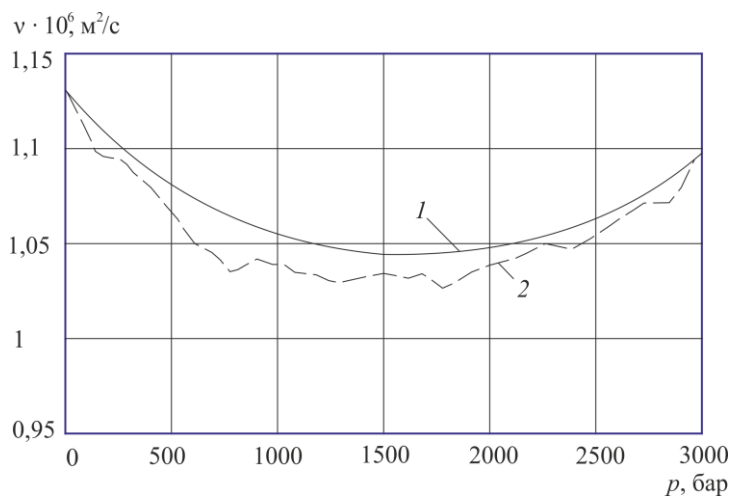


Рис. 3. Зависимости вязкости воды от давления при температуре 10 °С и частоте вращения ротора 8000 об/мин: 1 – капиллярный вискозиметр; 2 – ротационный вискозиметр

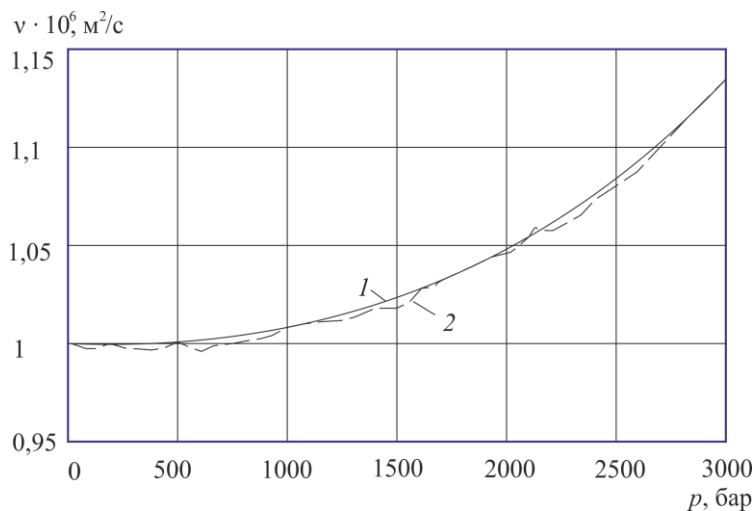


Рис. 4. Зависимости вязкости воды от давления при температуре 20 °С и частоте вращения ротора 1000 об/мин: 1 – капиллярный вискозиметр; 2 – ротационный вискозиметр

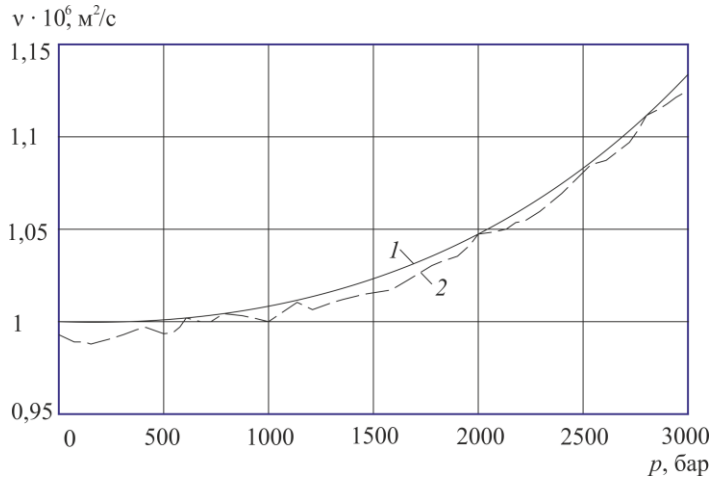


Рис. 5. Зависимости вязкости воды от давления при температуре 20 °С и частоте вращения ротора 8000 об/мин: 1 – капиллярный вискозиметр; 2 – ротационный вискозиметр

Опишем в общем виде действующие в жидкости силы, приводящие к подобным явлениям. Для этого запишем математическое выражение теоремы об изменении кинетической энергии для произвольного объема жидкости [6, 7]:

$$\rho \frac{d \vec{v}^2}{dt} = \rho \vec{F} \vec{v} + \frac{\partial(\vec{p}_i \vec{v})}{\partial x_i} + \rho N^{(i)}, \quad (3)$$

где \vec{v} – вектор скорости; ρ – плотность; \vec{p}_i – вектор напряжений, $\vec{p}_i = \vec{e}_j \vec{p}_{ji}$; \vec{F} – напряжение массовых сил; $N^{(i)}$ – удельная мощность внутренних сил.

Видно, что скорость изменения кинетической энергии равна мощности всех внешних и внутренних сил.

Представим один из членов предыдущего выражения – удельную мощность внутренних сил как:

$$\rho N^{(i)} = -p_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\vec{e}_j p_{ij} \frac{\partial \vec{e}_k v_k}{\partial x_i} = -p_{ik} \frac{\partial v_k}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где \vec{e}_j , \vec{e}_k – базисы.

Данное равенство показывает, что при движении всех точек рассматриваемого объема с одинаковыми скоростями работа внутренних сил равна нулю, а получение значений работы внутренних сил отличных от нуля возможно только в пространственно неоднородном поле скоростей.

Переписав полученное уравнение, для вязкой сжимаемой жидкости получим

$$\rho N^{(i)} = -[-p + (\zeta - 2/3\mu) \operatorname{div} \vec{v}] \operatorname{div} \vec{v} - 2\mu \cdot e_{ij} e_{ij} = p \operatorname{div} \vec{v} - W, \quad (5)$$

где ζ – коэффициент объемной вязкости; μ – динамический коэффициент вязкости; e_{ij} – скорость сдвига, а мощность диссипативных сил, обусловленных вязкостью,

$$-W = -(\zeta - \frac{2}{3}\mu) \cdot (\operatorname{div} \vec{v})^2 - 2\mu \cdot e_{ij} e_{ij}. \quad (6)$$

Теперь запишем уравнение притока тепла в общем виде:

$$\frac{du}{dt} = q_e - N^{(i)}, \quad (7)$$

где q_e – удельное по массе количество тепла, подводимое к жидкому объему в единицу времени.

Подставив в него соотношение (5), получим уравнение притока тепла для вязкой сжимаемой жидкости:

$$\frac{d}{dt} = q_e - \frac{p}{\rho} \operatorname{div} \vec{v} - \frac{W}{\rho}. \quad (8)$$

Данное равенство позволяет численно оценивать изменение удельной внутренней энергии за счет работы внутренних сил при сверхвысоких давлениях.

Рассмотрим теперь зависимость энергетических процессов, протекающих в исследуемой системе, от молекулярной структуры вещества. Важной характеристикой термодинамической системы является ее внутренняя энергия – суммарная энергия теплового движения микрочастиц системы и энергия взаимодействия этих частиц. Поскольку движение материальных точек происходит в пространстве и во времени, движение тела можно представить как комбинацию поступательно-

го и вращательного движений, а положение тела в каждый момент времени характеризуется числом степеней свободы, т.е. числом независимых переменных, полностью определяющих положение системы в пространстве. В реальной молекуле жесткой связи между атомами не существует, атомы в ней могут сближаться и расходиться, совершая колебания около положения равновесия. Энергия колебательного движения молекулы является суммой кинетической и потенциальной энергий, средние значения которых одинаковы. При изучении систем технических углеводородов возможно допущение – рассмотрение их как разновидности полимерных систем. Особенности молекулярно-кинетических свойств различных растворов высокомолекулярных соединений четко проявляются в таких явлениях, как броуновское движение и диффузия. Частицы систем, участвующие в тепловом движении, подчиняются всем молекулярно-кинетическим законам. В зависимости от размера частиц их движение может быть различным [8]. Частицы коллоидной степени дисперсности, испытывая с различных сторон многочисленные удары молекул жидкости, могут перемещаться поступательно в разнообразных направлениях [9]. С ростом размера частиц сначала наблюдается прекращение поступательного броуновского движения, затем исчезает вращательное движение и остается колебательное. Следовательно, чем крупнее частица, тем меньше величина ее смещения. Математическим описанием данной закономерности является уравнение Эйнштейна – Смолуховского [10]:

$$\bar{\Delta}^2 = \frac{RT}{3\pi\eta r N_A} t, \quad (9)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; η – динамическая вязкость; r – радиус взвешенных частиц; N_A – постоянная Авогадро; t – время.

Также Эйнштейном была описана зависимость коэффициента диффузии частиц от размера диффундирующих частиц и других значимых факторов уравнением [11]:

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta r N_A}, \quad (10)$$

где r – радиус частиц, размер которых много больше размера молекул растворителя, а значение коэффициента диффузии D возможно найти экспериментально [2].

Запишем плотность как отношение динамической вязкости жидкости к коэффициенту кинематической вязкости [7]:

$$\rho = \frac{\eta}{\nu}. \quad (11)$$

Выразив динамическую вязкость из (10) и подставив ее в (11), представим плотность как

$$\rho = \frac{RT}{6D\pi\eta r N_A}. \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в (8) получаем уравнение, которое дает возможность оценить изменения внутренней энергии за счет работы внутренних сил с учетом размера частиц системы:

$$\frac{du}{dt} = q_e - \frac{6D\pi\nu r N_A}{RT} (p \operatorname{div} \vec{v} - W). \quad (13)$$

Благодаря допущениям, сделанным Эйнштейном для формулы расчета времени релаксации анизотропии, стало возможным ее применение к расчету отдельных молекул растворов и однокомпонентных жидкостей с небольшой вязкостью:

$$\tau = \frac{4\pi r^3 \eta}{3RT}. \quad (14)$$

Перепишем уравнение (13) с учетом выражение (14) и получим

$$\frac{du}{dt} = q_e - \frac{9D\nu N_A \tau}{2\eta r} \left(p \operatorname{div} \vec{v} - \left(\left(\zeta - \frac{2}{3} \mu \right) \cdot (\operatorname{div} \vec{v})^2 - 2\mu \cdot e_{ij} e_{ij} \right) \right). \quad (15)$$

Данное выражение позволяет рассмотреть зависимость удельной внутренней энергии системы от размера частиц с учетом воздействия сверхвысоких давлений и времени релаксации анизотропии. Его применение возможно при описании систем индивидуальных жидкостей, что позволяет моделировать вязкостные характеристики базовых масел.

Библиографический список

1. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: КолосС, 2003. – 305 с.
2. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во. Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
3. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. – М.: Энергомаш, 2000. – 400 с.
4. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. – М.: Изд-во. Моск. ун-та, 1974. – 161 с.
5. Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – М.: Наука, 1976. – 432 с.
6. Ельцов С.В. Физическая и коллоидная химия. – Харьков, 2005. – 240 с.
7. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990. – 345 с.
8. Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. – М.: Наука, 1984. – 371 с.
9. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 221 с.
10. Пташинский А.З. Флуктуационная теория фазовых переходов. – М.: Наука, 1982. – 379 с.
11. Фукс Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М.; Ижевск, 2003. – 328 с.

References

1. Shramm G. Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii [Fundamentals of practical rheology and rheometry]. Moscow: KolosS, 2003. 305 p.
2. Bibik E.E. Reologiya dispersnykh system [Rheology of disperse systems]. Leningradskiy universitet, 1981. 172 p.
3. Piralishvili Sh.A. Vikhrevoy effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions]. Moscow: Energomash, 2000. 400 p.

4. Zatsepina G.N. Svoystva i struktura vody [Structure and properties of water]. Moskovskiy gosudarstvennyy universitet, 1974. 161 p.

5. Tsiklis D.S. Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh [Technique of physicochemical researches at high and extra-high pressure]. Moscow: Nauka, 1976. 432 p.

6. Eltsov S.V. Fizicheskaya i kolloidnaya khimiya [Physical and colloid chemistry]. Kharkov, 2005. 240 p.

7. Anderson D. Vychislitel'naya gidromekhanika i teploobmen [Computational fluid mechanics and heat exchange]. Moscow: Mir, 1990. 345 p.

8. Zeldovich Ya.B. Izbrannye trudy. Khimicheskaya fizika i gidrodinamika [Selected works. Chemical physics and hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1984. 371 p.

9. Reyner M. Reologiya [Rheology]. Moscow: Nauka, 1965. 221 p.

10. Ptashinskiy A.Z. Fluktuatsionnaya teoriya fazovykh perekhodov [Fluctuation theory of phase transitions]. Moscow: Nauka, 1982. 379 p.

11. Fuks G.I. Vyazkost i plastichnost nefteproduktov [Toughness and ductility of petroleum products]. Moscow-Izhevsk, 2003. 328 p.

Об авторах

Редников Сергей Николаевич (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, e-mail: srednikov@mail.ru).

Найгерт Катарина Валерьевна (Челябинск, Россия) – инженер ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д. 76, e-mail: kathy_naigert@mail.ru).

About the authors

Rednikov Sergey Nikolaevich (Chelyabinsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydropneumoseystems, South Ural State University (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: srednikov@mail.ru).

Naigert Katharina Valerevna (Chelyabinsk, Russian Federation) – Engineer, South Ural State University (76, Lenin av., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation, e-mail: kathy_naigert@mail.ru).

Получено 23.01.2014