



УДК 676.024

СДВИГОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ ПЕРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

© Ю.А. Тихонов, д-р техн. наук, проф.

В.С. Куров, д-р техн. наук, проф.

Д.Р. Оруджов, асп.

С.-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, ул. Ивана Черных, 4, г. С.-Петербург, Россия, 198095;
e-mail: tamara_tpt@mail.ru

Сдвиговые течения бумажной массы имеют место в различных аппаратах бумажной промышленности (между ротором и ситом гидроразбивателей, сортировок, в вихревых потоках центриклинеров, в конфузорных каналах напорных ящиков, на сенсорных элементах измерителей концентрации и др.). При этом в широком технологическом диапазоне концентрации массы 0,5 ... 5,0 % важна степень дисперсности массы (уровень флокуляции), которая должна быть сравнима с отверстиями или щелями сит (0,1 ... 10,0 мм) или требуемым размером флокул на сетке бумагоделательной машины. Реологии и дефлокуляции бумажной массы посвящено большое количество работ, из которых сложно проследить закономерности изменения реологических параметров и степени дисперсности массы в зависимости от ее концентрации. Побочные течения в известных вискозиметрах, использующихся для определения реологических характеристик многокомпонентных неньютоновских сред, какой является бумажная масса, затрудняет выявление этих закономерностей. В данной работе в экспериментальном вискозиметре создавалось однородное сдвиговое течение бумажной массы переменной концентрации в зазоре между вращающимся с регулируемой скоростью и неподвижным, регистрирующим образующийся на нем момент, кольцами, что позволило определить экспериментальные зависимости напряжений от среднего градиента скорости в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения, построить графические зависимости вязкости массы переменной концентрации от градиента скорости и получить их аналитическое описание. На основании описания и двухслойной модели турбулентности получены безразмерное распределение скорости, а также толщина пограничного слоя в различных режимах сдвигового течения, являющегося важной характеристикой потока между ситом и ротором сортирующего оборудования. Приведены зависимости напряжений от концентрации при переменной скорости вращения стенки. Сравнение последних с характеристиками известных измерителей концентрации показало их хорошую качественную сходимость. Представлена схема распада флокулы в сдвиговом течении. Приложение известных формул гидромеханики к этой схеме с учетом представленных экспериментальных характеристик позволило установить аналитические и графические зависимости повышения степени дисперсности массы (уменьшение размера флокул) различной концентрации при увеличении градиента скорости, что согласуется с известными данными.

Ключевые слова: напряжения сдвига, градиент скорости, вязкость, концентрация массы, размер флоккул, толщина пограничного слоя.

Сдвиговые течения в зазоре между подвижной и неподвижной поверхностями имеют место в различных аппаратах, например, между ротором и ситом гидроразбивателя и сортировки, в горле центриклинера, барабане фильтра и формера. Основные закономерности сдвиговых течений используются при расчете систем массоподготовки и напуска. При этом важна степень дисперсности массы (дефлокуляции), часто являющаяся необходимым условием в различных стадиях технологического процесса.

Реологии и дефлокуляции массы посвящено большое количество работ, из которых, однако, сложно проследить закономерности изменения реологических параметров и степени дисперсности массы при изменении ее концентрации в основном технологическом диапазоне (0,5 ... 5,0 %) подготовки бумажной массы [4, 6, 7]. Побочные эффекты в ротационных вискозиметрах, используемых для определения реологических характеристик сложных не-ньютоновских сред, какой является бумажная масса, затрудняют выявление этих закономерностей. Для уменьшения искажающих эффектов в данной работе использовали модифицированный дисковый вискозиметр (рис. 1) [2, 3].

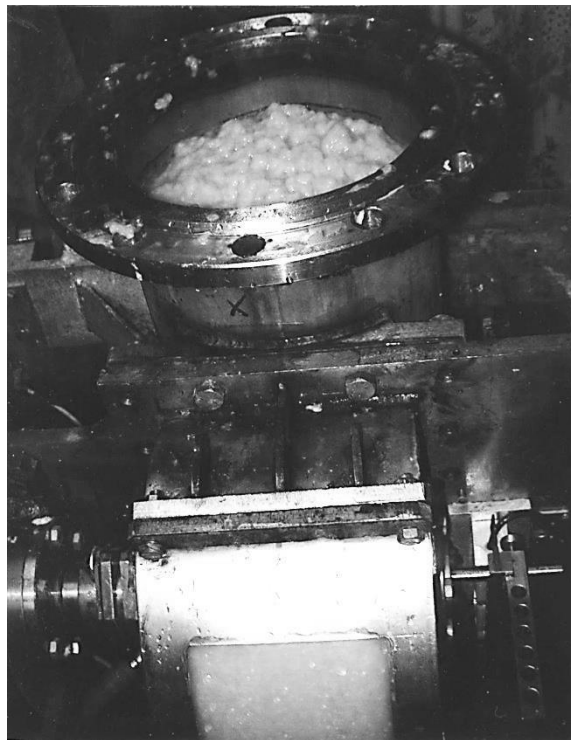


Рис. 1. Модифицированный кольцевой вискозиметр

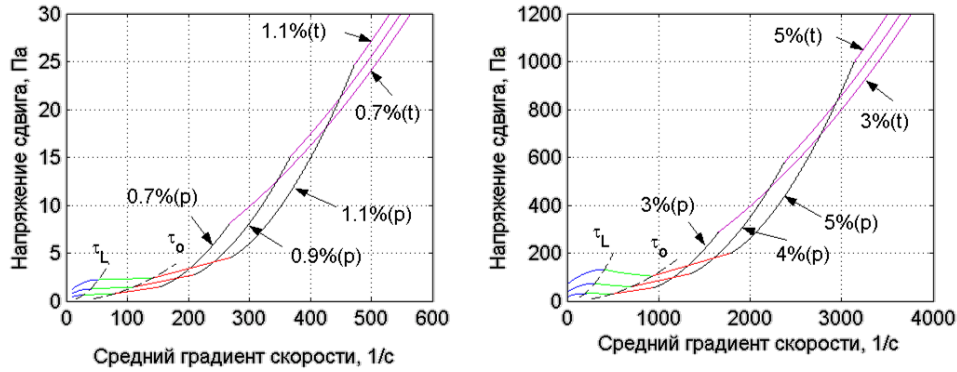


Рис. 2. Зависимость сдвиговых напряжений τ от среднего градиента скорости γ для массы концентрацией $c = 0,7 \dots 5,0$ % в ламинарном (L), переходном (p) и турбулентном (t) режимах течения (τ_0 и τ_L – напряжения, при которых кажущаяся вязкость достигает соответственно наименьших (μ_0) и наибольших (μ_L) значений ньютоновской вязкости)

В вискозиметре создавалось сдвиговое течение между вращающимся с окружной скоростью V и неподвижным кольцами и определялась зависимость сдвиговых напряжений τ в зазоре шириной S от среднего градиента скорости $\gamma = V/S$. Для неразмолотой сульфитной целлюлозы концентрацией $c = 0,7 \dots 5,0$ % связь между сдвиговыми напряжениями и средним градиентом скорости представлена на рис. 2. В экспериментальных исследованиях температуру суспензии поддерживали постоянной (около 22°C).

Штриховые линии τ_L и τ_0 образуют между собой зону, где течение массы происходит в соответствии со сходными зависимостями. Определим из ламинарной области течения на рис. 2 кажущуюся вязкость $\mu = \tau/\gamma$ (рис. 3). Штриховые линии τ_L и τ_0 из рис. 2 перешли в штриховые прямые линии μ_L и μ_0 на рис. 3.

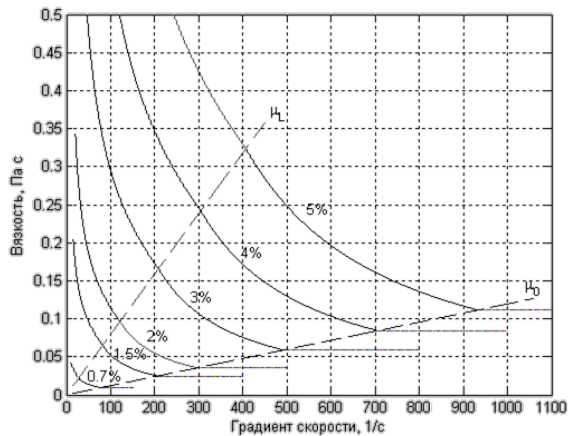


Рис. 3. Зависимость вязкости массы концентрацией $c = 0,7 \dots 5,0$ % от градиента скорости

Согласно гипотезе профессора Э.Л. Акима, для каждой концентрации массы существует область течения, где она движется аналогично ньютоновской жидкости, меняя свою вязкость от наибольшей μ_L до наименьшей μ_0 , в дальнейшем практически постоянной.

Рис. 3 подтверждает гипотезу Э.Л. Акима: в области $\gamma_L \leq \gamma \leq \gamma_0$ вязкость μ для каждой концентрации меняется по закону

$$\mu = \mu_0 \left(\gamma_0 / \gamma \right)^\varphi. \quad (1)$$

В области малых градиентов $0 < \gamma \leq \gamma_L$ для определения кажущейся вязкости используем следующую формулу:

$$\mu = \mu_L \left[\left(1 - K_n \right) \left(2 - \frac{\gamma}{\gamma_L} \right) + K_n \frac{\gamma_L}{\gamma} \right], \quad (2)$$

где $K_n = \frac{\tau_n}{\tau_L}$;

τ_n – начальное напряжение, при котором масса приобретает текучесть.

С учетом формул (1), (2) и двухслойной модели турбулентности [1, 5] на рис. 4 приведено распределение скоростей для массы различной концентрации во всех режимах течения с указанием в переходном и турбулентном режимах толщины ламинарного слоя δ , которая уменьшается с увеличением скорости V .

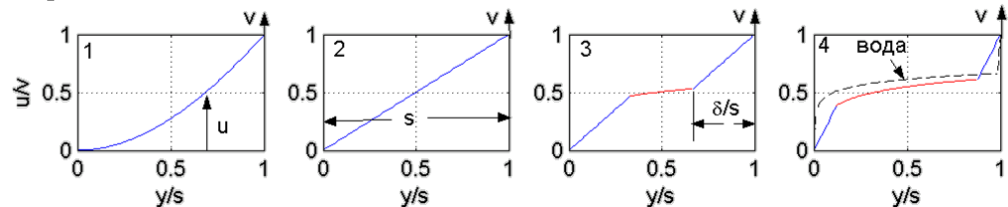


Рис. 4. Распределение скорости массы u по зазору S между неподвижной и движущейся со скоростью V стенками: 1 – до момента достижения наибольшей ньютоновской вязкости μ_L ($c = 0,7\%$, $V = 0,11$ м/с; $c = 3,0\%$, $V = 0,84$ м/с; $c = 5,0\%$, $V = 1,63$ м/с); 2 – в конце ламинарного режима течения ($c = 0,7\%$, $V = 1,91$ м/с; $c = 3\%$, $V = 11,78$ м/с; $c = 5,0\%$, $V = 22,3$ м/с); 3 – в переходном режиме при толщине ламинарного слоя $\delta/S = 0,33$ ($c = 0,7\%$, $V = 2,35$ м/с; $c = 3\%$, $V = 14,5$ м/с; $c = 5\%$, $V = 25$ м/с); 4 – в начале турбулентного режима при толщине ламинарного слоя $\delta/S = 0,12$ ($c = 0,7\%$, $V = 3,36$ м/с; $c = 3,0\%$, $V = 20,7$ м/с; $c = 5,0\%$, $V = 39,2$ м/с; вода: $V = 3,36$ м/с, $\delta/S = 0,012$)

Толщина ламинарного слоя δ в турбулентном режиме является важным параметром, например, для сит напорных сортировок. Согласно рис. 4, каждой концентрации будет соответствовать определенная скорость ротора, при которой толщина пограничного слоя δ на поверхности профильного сита становится равной высоте профиля $\Delta \approx 1$ мм и слой становится турбулентным (рис. 5), в то время как на поверхности гладкого сита он ламинарный (рис. 6).

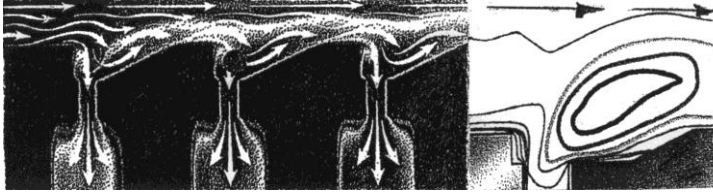


Рис. 5. Турбулентный пограничный слой на профильном сите

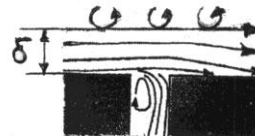


Рис. 6. Ламинарный пограничный слой на гладком сите

Соответственно, разделение флоккул на волокна и проход последних через отверстия или щели профильных сит происходит легче, чем для гладких.

Для измерения концентрации представим графики (см. рис. 2) в виде зависимостей напряжений сдвига τ от концентрации c при различных скоростях V и фиксированном зазоре S (рис. 7).

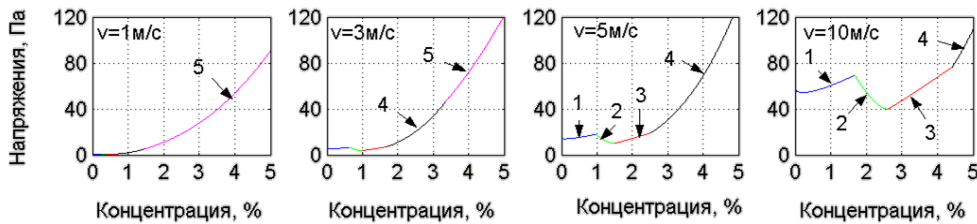


Рис. 7. Зависимость сдвиговых напряжений от концентрации массы в зазоре между неподвижной и подвижной стенками при различной скорости ($V = 1 \dots 10$ м/с): 1 – область турбулентного режима; 2 – переходного режима; 3 – постоянной наименьшей ньютоновской вязкости; 4 – переменной ньютоновской вязкости; 5 – неньютоновского течения

Рис. 7 иллюстрирует смещение зон режимов течения массы от турбулентного до неньютоновского в диапазоне концентрации (0...5,0 %) в зависимости от скорости движения стенки. Сдвиговые напряжения, умноженные на площадь хорошо обтекаемого профиля, дают силу, трансформируемую в выходной сигнал в измерителях концентрации [8].

На рис. 8 показана типичная зависимость выходного сигнала от концентрации массы для ротационных измерителей концентрации массы [9]. Сравнение рис. 7 и рис. 8 показало общность основных закономерностей сдвигового течения.

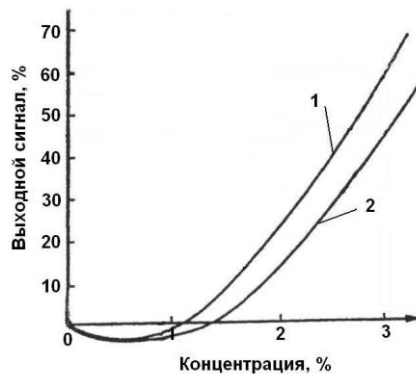


Рис.8. Зависимость выходного сигнала от концентрации в ротационных измерителях концентрации массы: 1 – измеритель GW; 2 – измеритель KR

Определим структурные изменения (дефлокуляцию) в сдвиговом течении согласно рис. 9.

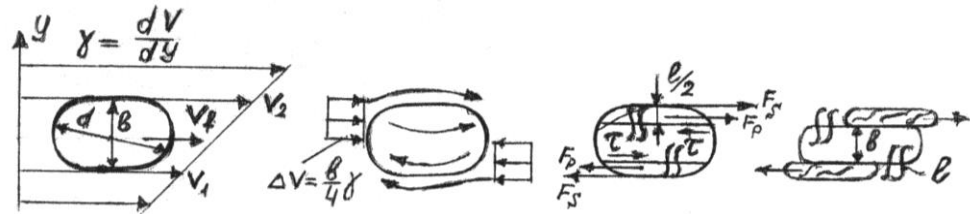


Рис. 9. Схема разрушения флоккулы в сдвиговом течении как зависимость ее толщины b от градиента скорости γ

В сдвиговом течении при $\gamma \geq \gamma_L$ имеет место относительная скорость флоккулы и потока $\Delta V = \frac{b}{4}\gamma$, вследствие чего на сектор флоккулы толщиной, равной половине длины волокна ($l/2$), действуют силы F_p (на гранях флоккул) и F_s (на боковой поверхности), суммарное воздействие которых приводит к возникновению напряжений τ , стремящихся преодолеть напряжения зацепления волокон τ_L (рис. 2). Приложение формул гидромеханики [7] к схеме, изображенной на рис. 9, приводит к следующей зависимости:

$$\tau_L = \frac{0,088\sqrt{\rho\mu}\gamma^3 d \left(\frac{b}{d}\right)^{1,5} \left[1 - \left(\frac{b}{d}\right)^2\right]^{0,75} + 0,25\mu\gamma \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left\{3\left(1 - \frac{l}{b}\right)^2 - \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{l}{b}\right)^4\right]\right\}}{1 - \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left(1 - \frac{l}{b}\right)^2},$$

где $\mu = \mu_0 (\gamma_0/\gamma)^q$ при $\gamma_L \leq \gamma \leq \gamma_0$; $\mu = \mu_0 = \text{const}$ при $\gamma \geq \gamma_0$.

Графики этой зависимости до наступления переходного режима γ_p для массы различной концентрации представлены на рис. 10 при $d = 10$ мм, соответствующему начальному диаметру флоккул и длине волокна $l = 2$ мм.

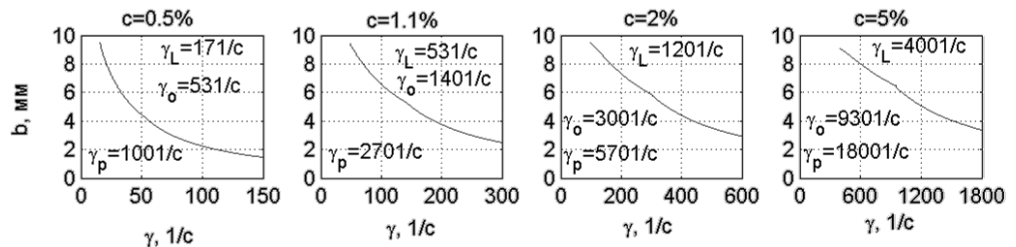


Рис. 10. Зависимость толщины флоккулы b от градиента скорости γ для массы концентрации $c = 0,5...5,0$ % в ламинарном режиме течения (γ_L, γ_0 – градиенты, соответствующие наибольшей (μ_L) и наименьшей (μ_0) ньютоновской вязкости)

Сравнение рис. 3 и рис. 10 показало, что снижение вязкости в сдвиговом течении обусловлено уменьшением толщины флоккул.

Выводы

1. Использование кольцевого (дискового) вискозиметра позволяет уменьшить влияние искажающих эффектов при получении реологических характеристик.

2. На основании теоретических зависимостей пристеночного распределения скорости для бумажной массы переменной концентрации предложена зависимость напряжений сдвига от среднего градиента скорости и концентрации.

3. Получены основные характеристики течения массы переменной концентрации в ламинарном и турбулентном режимах, хорошо согласующиеся с известными экспериментальными данными, с зависимостью коэффициента гидравлического трения, перепада давления и степени дисперсности флоккулированного стержня от средней скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аббасов А.А.* Гидродинамические исследования вопросов движения вязкопластичных жидкостей. Баку: Азербайдж. ССР, Изд-во АН, 1967. 241 с.
2. А.с. 1449868 СССР, МПК G 01 N 11/14. Дисковый вискозиметр / Васильева С.Г., Тихонов Ю.А., Тотухов Ю.А., Терентьев О.А., Синегубов С.С., Каменев А.А. №4229822; заявл. 13.04.87; опубл.07.01.89, Бюл. № 1. 3 с.
3. А.с. 1541493 СССР, МПК G 01 N 11/14. Вискозиметр / Васильева С.Г., Тихонов Ю.А., Тотухов Ю.А., Терентьев О.А., Синегубов С.С. №4414351; заявл. 25.04.88; опубл. 07.02.90, Бюл. № 5. 3 с.
4. *Кугушев И.Д., Терентьев О.А.* Бумагоделательные и картоно-делательные машины. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 598 с.
5. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 257 с.
6. *Терентьев О.А.* Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 248 с.
7. *Тихонов Ю.А.* Основы теории диспергирования бумажной массы при сортировании и напуске на бумагоделательную машину: дисс....д-ра техн. наук. СПб., 2012. 338 с.
8. *Bennigton C., Kerekes R.* Power Requirements for Pulp Suspension Fluidization // TAPPI. 1996. Vol.79, N 2. P. 253–258.
9. *Olander R., Agneus L.* Consistency Measurement: the Foundation for Accurate Dilution Control // TAPPI. 1997. March. P. 97–107.

Поступила 21.07.14

UDC 676.024

Shear Flows of Paper-Pulp of Varying Concentrations*Yu. A. Tikhonov, Doctor of Engineering, Professor**V. S. Kurov, Doctor of Engineering, Professor**D.R. Orudzhov, Postgraduate Student*

Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, Ivana Chernyh street, 4, Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: tamara_tpt@mail.ru

Shear flows of paper-pulp occur in various devices in paper industry machines, for example, between the rotor and sieve pulpers, grading machines, in eddy flows of centricleaners, in converging ducts of flow boxes, in sensing elements of concentration meter. Thus, in a wider technological mass concentration range of 0.5 ÷ 5 %, the degree of mass dispersion (the level of flocculation) is of importance, which should be comparable to the sieve holes of 10 ÷ 0.1 mm or to a required size of flocculation of the papermachine.

Rheology and paper - pulp deflocculation is covered in many studies, in which, however, it is difficult to trace the patterns of change of the rheological parameters and degree of mass dispersion depending on its concentration. Adverse flows in the known viscometers used to measure the rheological properties of multicomponent non-Newtonian ambient, such as paper - pulp, makes it difficult to identify these patterns. In this paper, in an experimental viscometer a homogeneous shear flow of paper – pulp of variable consistency was created in the gap between the rings. One ring was rotating at a variable speed, and the other was fixed, which allowed defining the experimental dependence of the stresses of the average velocity gradient in laminar, transient and turbulent flow cycles, to construct a characteristic curve of viscosity of variable mass concentration on the velocity gradient and get their analytical description. On its based and two-layer turbulence model, a dimensionless velocity distribution was defined, as well as the boundary layer thickness in different modes of shear flow, which is an important characteristic of the flow between the rotor and the sieve of the sorting equipment. Representation of characteristic curve of stresses to velocity gradient at a variable concentration as characteristic curves of stresses to concentration at variable rotational speed of the wall is reported. Comparison of the latter with the characteristics of the known concentration meters demonstrates their good quality convergence. A scheme of the floccules collapse in a shear flow is also represented. Application of the known formulas of fluid mechanics to this scheme, taking into consideration the experimental characteristics, shows analytical and graphical dependencies of increase of the degree of mass dispersion (floc size reduction) of various concentrations with increasing velocity gradient that corresponds to the known data.

Keywords: shear, velocity gradient, viscosity, concentration of mass, size of flocculation, the boundary layer thickness.

REFERENCES

1. Abbasov A.A. *Gidrodinamicheskie issledovaniya voprosov dvizheniya vyazkoplastichnykh zhidkostey* [Hydrodynamic Research on the Motion of Viscoplastic Fluids]. Baku, 1967. 241 p.

2. Vasil'eva S.G., Tikhonov Yu.A., Totukhov Yu.A., Terent'ev O.A., Sinegubov S.S., Kamenev A.A. *Diskovyy viskozimetr* [Disc Viscometer]. Inventor's certificate USSR, no. 4229822, 1989.
3. Vasil'eva S.G., Tikhonov Yu.A., Totukhov Yu.A., Terent'ev O.A., Sinegubov S.S. *Viskozimetr* [Viscometer]. Inventor's certificate USSR, no. 4414351, 1990.
4. Kugushev I.D., Terent'ev O.A. *Bumagodelatel'nye i kartonno-delatel'nye mashiny* [Paper and Cardboard-Making Machines]. St. Petersburg, 2011. 598 p.
5. Loytsyansky L.G. Лойцянский Л.Г. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Moscow, 1973. 257 p.
6. Terent'ev O.A. *Gidrodinamika voloknistykh suspenziy v tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve* [Hydrodynamics of Fiber Suspensions in the Pulp and Paper Industry]. Moscow, 1980. 248 p.
7. Tikhonov Yu.A. *Osnovy teorii dispergirovaniya bumazhnoy massy pri sortirovani i napuske na bumagodelatel'nyu mashinu: dis. ... dok. tehn. nauk* [Fundamentals of the Theory of Dispersion of Pulp for Separation and Puffing on a Paper Machine: Dr. Tech. Sci. Diss]. St. Petersburg, 2012. 338 p.
8. Bennigton C., Kerekes R. Power Requirements for Pulp Suspension Fluidization. *TAPPI*, 1996, vol.79, no. 2, pp. 253–258.
9. Olander R., Agneus L. Consistency Measurement: the Foundation for Accurate Dilution Control. *TAPPI*, 1997, pp. 97–107.

Received on July 21, 2014
