

УДК 676.1.038.2

М.А. Агеев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ СЕТЬ ВОЛОКОН МАКУЛАТУРЫ

Показано, что неразрушенная структура волокнистой суспензии при концентрациях, применяемых при облагораживании макулатуры, представляет для пузырька большое гидравлическое сопротивление, приводящее к снижению в несколько раз скорости пузырька по отношению к его движению в неограниченном объеме воды. Установлена зависимость коэффициента сопротивления движения пузырька от числа Рейнольдса.

Ключевые слова: флотация, облагораживание макулатуры, пузырек воздуха, волокнистая суспензия, коэффициент гидравлического сопротивления, число Рейнольдса.

Более половины всей бумаги в мире изготавливается из вторичных волокон. Очевидность повторного использования волокнистого сырья в бумажной промышленности в настоящее время обусловлена экономическими и экологическими соображениями. Особенно важно использовать макулатуру в режиме рециклинга, т.е. получать бумагу такого же качества, как и сырье, следовательно, макулатуру необходимо облагораживать.

Основной процесс облагораживания макулатуры – удаление частиц типографской краски методом флотации. При этом эффективность удаления частиц краски во многом зависит от количества, размеров и скорости подъема пузырьков воздуха, а также от взаимодействия их с частицами краски.

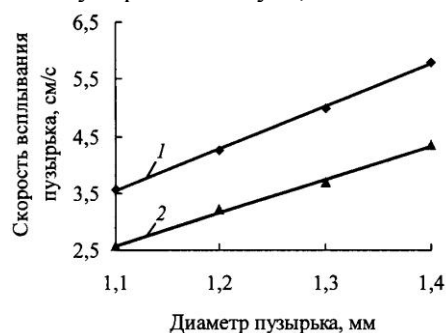


Рис. 1. Зависимость скорости всплытия пузырьков воздуха в воде от их диаметра: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

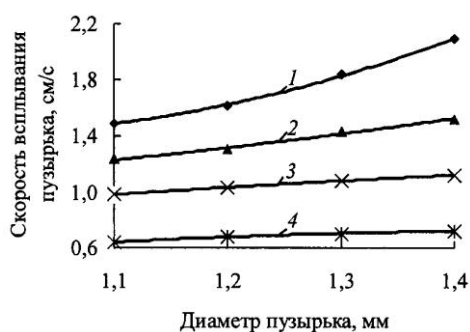


Рис. 2. Зависимость скорости всплытия пузырьков воздуха в макулатурной массе от их диаметра и концентрации массы: 1 – 0,3 %; 2 – 0,5; 3 – 0,7; 4 – 1,1 %

Поэтому изучение поведения пузырьков воздуха в волокнистой суспензии является актуальным.

В качестве вторичного волокна использовали суспензию газетной макулатуры. Среди факторов, играющих наиболее существенную роль в эффективности флотации, нами были рассмотрены: размер пузырька, степень помола волокна, концентрация волокнистой массы.

В экспериментах диаметр пузырьков варьировали в диапазоне 1,1 ... 1,4 мм, степень помола – 30 ... 50 °ШР, концентрацию массы – 0,1 ... 1,1 %.

На рис. 1 представлены теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости скорости подъема пузырьков в воде от их диаметра. Теоретическая кривая вычислена по полученному Левичем уравнению [1]:

$$V = \frac{1}{9} \frac{R^2 g (\rho - \rho')}{\mu},$$

где V – скорость подъема пузырька, м/с;
 R – радиус пузырька, м;
 g – ускорение силы тяжести, м/с²;
 ρ, ρ' – плотность соответственно жидкости и газа, н·с²/м⁴;
 μ – вязкость.

Видно, что при движении в воде экспериментальные скорости подъема пузырьков отличаются от теоретических не более чем на 25 %, в то время как скорости подъема пузырьков в волокнистой суспензии (рис. 2) имеют совершенно другие закономерности. С увеличением диаметра пузырьков скорость их подъема увеличивается незначительно.

На рис. 3 представлена зависимость скорости подъема пузырьков в волокнистой структуре различной концентрации.

С увеличением концентрации волокнистой суспензии скорость движения пузырьков падает и при концентрации массы 1,5 % практически

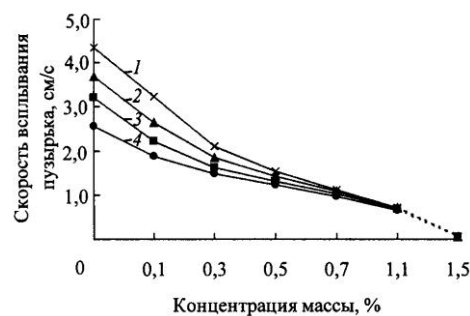


Рис. 3. Зависимость скорости всплывания пузырьков воздуха от концентрации макулатурной массы (степень помола 50 °ШР) и диаметра пузырьков: 1 – 1,4 мм; 2 – 1,3; 3 – 1,2; 4 – 1,1 мм

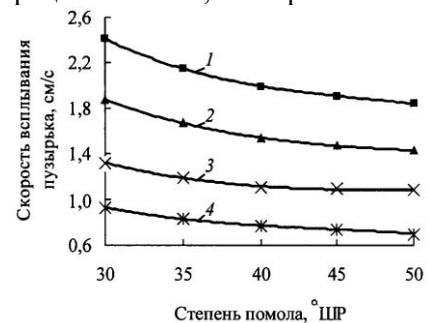


Рис. 4. Зависимость скорости всплывания пузырьков воздуха от степени помола макулатурной массы (диаметр пузырька 1,3 мм) и ее концентрации: 1 – 0,3 %; 2 – 0,5; 3 – 0,7; 4 – 1,1 %

равна нулю, поэтому и эффективность процесса флотации при такой концентрации довольно низкая.

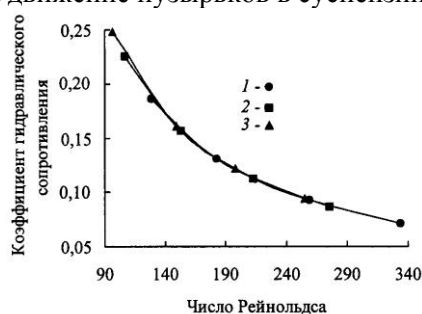
В ходе изучения влияния степени помола макулатурной массы на скорость подъема пузырьков воздуха установлено, что с увеличением степени помола скорость подъема падает (рис. 4).

Наблюдения за поведением пузырьков во флотационной ячейке показали, что если в дистиллированной воде пузырьки поднимаются практически вертикально, то в волокнистой суспензии, являющейся несжимаемой неньютоновской вязкой жидкостью, они перемещаются зигзагообразно, с переменной скоростью. Чтобы пузырьки поднялись до поверхности волокнистой суспензии, они должны преодолеть гидравлическое сопротивление структуры суспензии. При степени помола 30 °ШР размеры пор сети волокон больше, чем при 50 °ШР, поэтому гидравлическое сопротивление движению пузырьков меньше, что приводит к увеличению скорости их подъема. Высокая концентрация волокнистой суспензии увеличивает плотность сети волокон, снижая скорость подъема. При применяемых в эксперименте размерах пузырьков и концентрациях волокон структура волокнистой суспензии оставалась неразрушенной.

Для аналитического описания движения пузырьков в волокнистой суспензии рассмотрим зависимость коэффициента гидравлического сопротивления f_r от скорости подъема пузырьков воздуха или числа Рейнольдса $f_r = f(Re)$. Известно [2], что при движении пузырьков в стоксовском режиме эта зависимость выглядит следующим образом: $f = 24/Re$.

Представленная на рис. 5 экспериментальная зависимость f от Re при движении пузырьков в порах неразрушенной макулатурной суспензии показывает, что численные значения f зависят от степени помола. Это свидетельствует о том, что, во-первых, на движение пузырьков в суспензии ока-

Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления пузырька (диаметр 1,3 мм) от числа Рейнольдса и степени помола: 1 – 30 °ШР, 2 – 40, 3 – 50 °ШР



зывает влияние размер пор, во-вторых, длина пути движения пузырьков в макулатурной суспензии значительно больше, чем в чистой воде.

Выводы

1. В исследованном диапазоне размеров пузырьков их диаметр слабо влияет на скорость подъема в волокнистой суспензии (при этом форма пузырьков не отличается от сферической).

2. С увеличением концентрации макулатурной суспензии скорость пузырьков асимптотически убывает и при концентрации 1,5 % стремится к нулю.

3. В исследованном диапазоне степени помола (30 ... 50 °ШР) скорость движения пузырьков в зависимости от концентрации суспензии уменьшается на 20 ... 30 %.

4. При движении пузырьков воздуха в неразрушенной структуре волокнистой суспензии коэффициент гидравлического сопротивления является функцией только числа Re и не зависит от физико-механических свойств макулатурной суспензии при допущении, что на движение пузырьков не влияют размеры пор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Городецкая, А.* Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса [Текст] / А. Городецкая // Журн. физ. химии. – 1949. – Т. XXIII, вып. 1. – С. 71–77.

2. *Ламб, Г.* Гидродинамика [Текст] / Г. Ламб. – М.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.

3. *Терентьев, О.А.* Гидродинамика волокнистых суспензий в целлюлозно-бумажном производстве [Текст] / О.А. Терентьев. – М.: Лесн. пром-ть, 1980. – 248 с.

Уральский государственный
лесотехнический университет

Поступила 17.01.06

М.А. Ageev

Experimental Research of Air Bubbles Movement through Fiber Net of Waste Paper

It is shown that undisturbed structure of fiber suspension under concentrations applied in wastepaper recovery means high hydraulic resistance for the bubble resulting in reduction of the bubble speed in several times with respect to its movement in the unlimited water volume. The dependence of resistance coefficient for the bubble movement on Reynolds number is established.