

УДК 62-252

**Ю.В. Науменко**

Науменко Юрий Васильевич родился в 1952 г., окончил в 1974 г. Украинский институт инженеров водного хозяйства, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных, дорожных, мелиоративных машин и оборудования Ровенского государственного технического университета. Имеет около 50 печатных трудов в области исследования динамики роторных систем с переменными инерционными параметрами.



### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ БАРАБАННЫХ МАШИН, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЕННЫХ ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ**

На основе полученных экспериментальных данных с учетом принятых критериев подобия движения построены универсальные графические зависимости, которые могут быть использованы для расчета скоростных и силовых параметров привода горизонтальных барабанных машин, частично заполненных жидким и сыпучим обрабатываемым материалом.

привод, барабанные машины, горизонтальные вращающиеся цилиндры, режимы движения.

В лесной, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности достаточно широко применяют горизонтальные барабанные машины, включающие весьма габаритные и энергоемкие системы. Рабочим органом таких машин является горизонтальный вращающийся цилиндр, частично заполненный легкодеформируемым обрабатываемым материалом. Установившееся движение материала в полости барабана при низких скоростях вращения характеризуют циркуляционным режимом, при высоких скоростях – режимом в виде квазиколецевого пристенного слоя. На основе анализа рабочих процессов этих машин все виды деформируемого обрабатываемого материала могут быть сведены к двум наиболее характерным – ньютоновской жидкости и сыпучему телу. Высокая производительность, простота конструкции, надежность и универсальность обусловили широкое использование таких машин.

Цель статьи – получить графические зависимости границ перехода режимов движения легкодеформируемого материала в барабане и рассчитать момент сопротивления его вращению при использовании для прогнозирования параметров привода горизонтальных барабанных машин.

В таблице приведена классификация рассматриваемых машин в порядке возрастания соотношения скоростей вращения  $\omega/\omega_p$ .

В настоящее время для расчета скорости вращения барабана с жидкостью используют «коэффициент гравитации», который показывает во сколько раз центробежная сила инерции превышает силу тяжести [7], для

### Горизонтальные барабанные машины

Тип машины	Технологический процесс	Вид материала	$R$ , м	$k$	$\omega$ , 1/с	$\frac{\omega}{\omega_p}$
Сушилки	Сушка	Сыпучий	0,25...2,50	0,04...0,30	0,1...1,0	0,04...0,15
Смесители	Смешивание	Сыпучий и жидкий	0,25...1,50	0,30...0,80	1,0...2,5	0,20...0,35
Окорочные машины	Окашивание древесины	Сыпучий	1,50...3,00	0,50...0,70	0,5...1,5	0,15...0,45
Цилиндрические триеры	Очистка и классификация зерна	Сыпучий	0,15...0,40	0...0,10	2,0...6,0	0,30...0,65
Сушильные паровые цилиндры	Сбор и удаление конденсата	Жидкий	0,50...3,00	0...0,10	2,0...25,0	0,50...1,50
Разделительные центрифуги	Осаждение и фильтрация	Жидкий	0,10...1,25	0...1,00	40,0...600,0	3,00...15,00

Примечание.  $R$  – радиус полости барабана,  $k$  – степень заполнения полости материалом,  $\omega$  – рабочая скорость вращения барабана,  $\omega_p$  – скорость стационарного вращения, при которой циркуляционный режим движения материала переходит в режим пристенного слоя при разгоне.

расчета технологических режимов барабанных машин с сыпучим материалом – «критическую» скорость, соответствующую равенству силы инерции и силы тяжести на свободной поверхности пристенного слоя [6]. Однако используемые зависимости не учитывают процессов взаимодействия деформируемого обрабатываемого материала с цилиндрической полостью вращающегося барабана, вследствие значительного числа ограничений и допущений не удовлетворяют требованиям корректности и универсальности, а расчеты на их основе не обеспечивают необходимой точности. Поэтому такие машины часто работают в неоптимальных технологических и энергетических режимах.

Экспериментальный анализ режимов движения жидкости при малой степени заполнения полости барабана применительно к сушильным паровым цилиндрам бумагоделательных машин приведен в [16–18]. Экспериментальные и аналитические исследования положения свободной поверхности при циркуляционной форме движения жидкости с высокой вязкостью представлены в [9], для большой степени заполнения – в [12]. Задача определения скоростных режимов движения пристенного слоя идеальной жидкости аналитически рассмотрена в [15]. Численный расчет параметров движения пристенного слоя вязкой жидкости с малой, по сравнению с радиусом

полости, толщиной представлен в [10]. Характерные режимы движения жидкости в барабане освещены в [11], там же предпринята попытка обобщения результатов в виде двухпараметрической диаграммы.

В [6] представлены методы определения параметров движения сыпучего материала в горизонтальном вращающемся барабане, основанные на упрощенной механической модели. Однако ее теоретические предпосылки входят в противоречие с экспериментальными данными.

Экспериментальные результаты показывают, что циркуляционное течение сыпучего материала в горизонтальном вращающемся барабане в виде гравитационных потоков относится к режиму быстрых движений [1, 13], его поведение при этом похоже на поведение вязкой жидкости в аналогичных условиях. Поэтому для описания движения материала могут быть приняты три критерия подобия установившегося течения жидкости – числа Рейнольдса  $Re$  и Фруда  $Fr$  на радиальной поверхности полости, а также степень ее заполнения материалом  $k$ :

$$Re = \omega R^2/\nu; Fr = \omega^2 R/g; k = V/(\pi R^2 L),$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$V$  – объем материала в полости;

$L$  – длина полости.

Первый критерий характеризует силы трения, второй – силы инерции, третий – геометрические параметры движения.

При циркуляционном движении образуются характерные зоны течения жидкости (рис. 1, *а*) и сыпучего тела (рис. 1, *б*), комбинации которых определяют режимы движения деформируемого материала. Для сыпучего

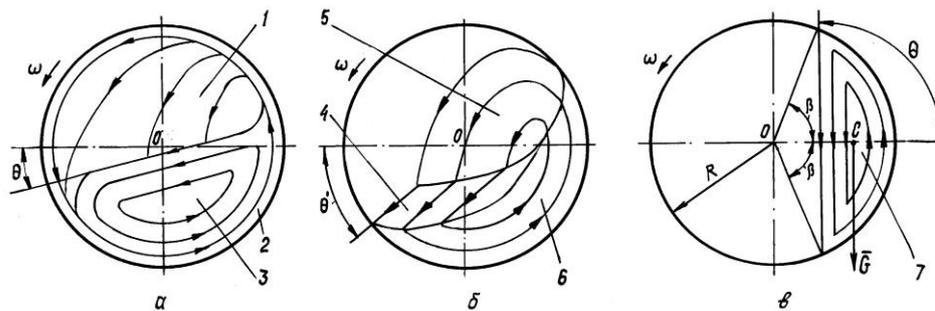


Рис. 1. Схема циркуляционного режима движения деформируемого материала в горизонтальном барабане: *а* – характерные зоны течения жидкости, *б* – зоны движения сыпучего материала, *в* – возникновение условного максимального момента сопротивления вращению; 1 – зона отделения с падением, 2 – пристенный слой, 3 – зона циркуляции, 4 – зона осыпания, 5 – зона подбрасывания с падением, 6 – твердотельная зона, 7 – идеальный сегмент;  $\theta$  – угол наклона свободной поверхности к горизонтали,  $\theta'$  – угол естественного откоса в движении

материала можно выделить следующие характерные (в порядке возрастания скорости вращения) режимы, связанные с реализацией технологических процессов [6]: режим без подбрасывания – включает только зоны твердотельную и осыпания; режим с частичным подбрасыванием – возникают все три зоны; режим с полным подбрасыванием – осыпание отсутствует; режим неполного центрифугирования – на поверхности полости возникает твердотельный слой из части материала с подбрасыванием остальной части; режим пристенного слоя – весь материал образует равномерный твердотельный кольцевой слой.

Для определения режимов движения деформируемого материала в горизонтальном вращающемся цилиндре была выполнена серия экспериментов [4, 5]. Данные, полученные для жидкости при  $k = 0,1$ , близки результатам [9, 10]. Поскольку все сыпучие материалы в рассматриваемом движении соответствуют жидкостям с достаточно близкими значениями вязкости, для простоты и удобства расчета применительно к сыпучему материалу было принято  $\nu \approx 1 \text{ м}^2/\text{с}$ , что, как показал эксперимент, близко значению  $\nu$  для жидкости с подобным поведением в аналогичных условиях.

На рис. 2 представлены диаграммы границ перехода циркуляционного режима и режима пристенного слоя движения жидкости в барабане, построенные на основании полученных экспериментальных данных в логарифмических осях  $Re$  и  $Fg$  для различных значений  $k$ . Зона выше границы соответствует режиму пристенного слоя. При больших значениях  $Re$  возникает явление режимного гистерезиса – превышение скорости вращения при образовании пристенного слоя жидкости во время разгона барабана над скоростью разрушения слоя в процессе его замедления [10, 16–18]. При малых значениях  $Re$  скорости образования и разрушения слоя одинаковы, что обусловлено возникновением вторичных течений [10].

На рис. 3 показаны диаграммы границ перехода характерных режимов движения сыпучего материала. Явления гистерезиса в этом случае не

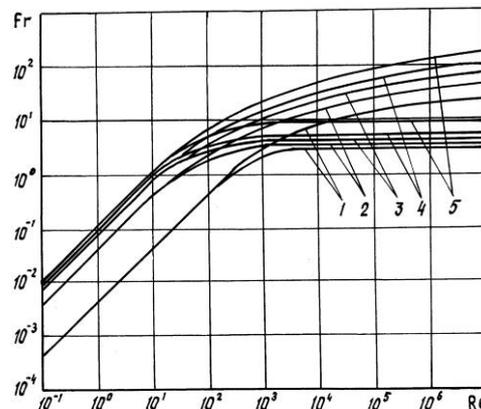


Рис. 2. Универсальные диаграммы границ перехода режимов движения жидкости в барабане: 1 –  $k = 0,1$ ; 2 –  $0,3$ ; 3 –  $0,5$ ; 4 –  $0,7$ ; 5 –  $0,9$

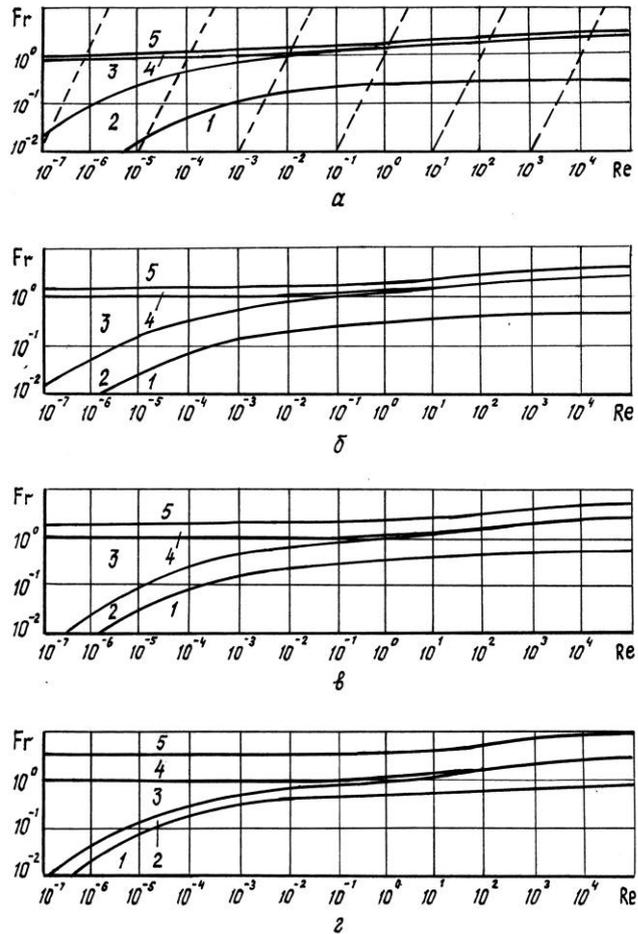


Рис. 3. Универсальные диаграммы границ перехода режимов движения сыпучего материала в барабане: 1 – режим без подбрасывания, 2 – с частичным подбрасыванием, 3 – с полным подбрасыванием, 4 – неполного центрифугирования, 5 – пристенного слоя;  $a - k = 0,3$ ;  $б - 0,5$ ;  $в - 0,7$ ;  $г - 0,9$

возникало. Каждая наклонная штриховая линия (рис. 3, а) соответствует барабану определенного радиуса.

Существенный прикладной интерес представляет также задача определения момента сопротивления вращению горизонтальных барабанных машин. Величина момента определяет мощность приводного двигателя. Квазистатическая зависимость момента сопротивления от скорости вращения барабана обуславливает требования к жесткости механической характеристики двигателя, при которой совместное установившееся вращение системы будет устойчивым. Кроме того, с помощью момента можно характеризовать вид и интенсивность циркуляционного движения

материала и определять эффективность реализации технологического процесса.

Анализ некоторых полученных экспериментально количественных и качественных зависимостей мощности привода от скорости вращения барабана с жидкостью представлен в [10, 18]. Системный анализ значительного числа экспериментальных данных с попытками получения обобщенных зависимостей мощности привода барабана с сыпучим материалом от ряда параметров приведен в [8, 14].

Для учета момента сопротивления в относительных величинах можно использовать относительный момент вращения барабана

$$\psi = M/M_{\max},$$

где  $M$  – действительный момент;

$M_{\max}$  – условный максимальный момент, который отвечает распределению материала в поперечном сечении в виде идеального твердого сегмента, повернутого вместе с барабаном относительно начального положения на прямой угол  $\Theta$ , момент равен произведению веса материала  $G$  на расстояние от центра тяжести сегмента  $C$  до оси барабана  $O$  (см. рис. 1, *в*):

$$M_{\max} = (2/3)R^3(\sin^3\beta)L\rho g.$$

Здесь  $\rho$  – объемная плотность материала;

$\beta$  – половина центрального угла идеального сегмента в сечении,

$$2\beta - \sin(2\beta) = 2\pi k.$$

Для определения момента сопротивления материала вращению горизонтального цилиндра была выполнена серия экспериментальных исследований [2, 3]. Полученные данные были близки результатам [6, 16, 18]. На рис. 4, 5 представлены графические зависимости момента  $\psi$  в координатах  $Re$  и  $Fr$  для жидкого и сыпучего материала. Линии на горизонтальных координатных плоскостях графиков соответствуют границам перехода режимов движения материала.

Анализ рис. 4, 5 демонстрирует близкое подобие движения сыпучего материала и жидкости с высокой вязкостью. Отличительной особенностью

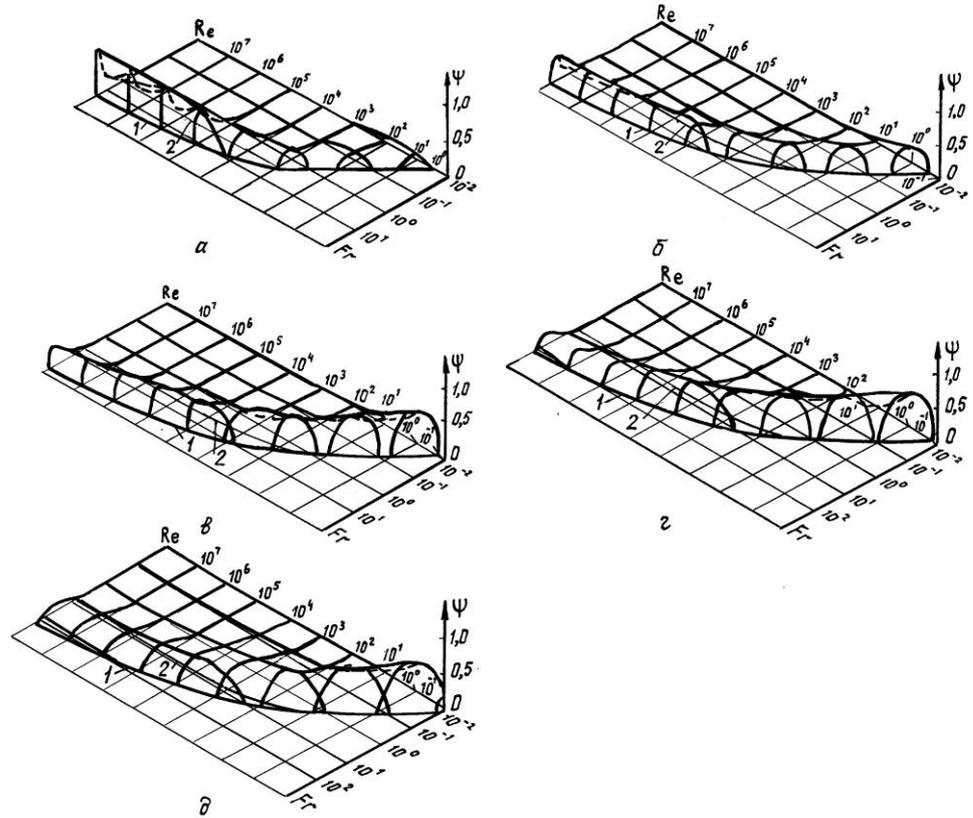


Рис. 4. Универсальные трехпараметрические зависимости относительного момента сопротивления вращению  $\psi$  барабана с жидкостью:  $a - k = 0,1$ ,  $б - 0,3$ ,  $в - 0,5$ ,  $г - 0,7$ ,  $д - 0,9$ ; 1 – граница перехода циркуляционного режима движения жидкости в режим пристенного слоя при разгоне барабана, 2 – граница обратного перехода режимов при замедлении

течения жидкости является ее прилипание к стенкам, слипание слоев и наличие режимного гистерезиса. Для сыпучего материала характерны твердотельное движение вблизи стенки и откосообразование при осыпании, когда при низкой скорости  $\omega$  момент  $\psi \rightarrow 0,5$ , что соответствует углу  $\Theta \approx 30^\circ$ . Момент  $\psi$  достигает заметных значений при циркуляционном режиме движения материала, а его величина зависит от характера движения. Для жидкости наибольшее значение  $\psi$  с ростом  $\omega$  возникает при увеличении  $\Theta$ , интенсивное снижение отмечено вследствие возрастания зоны отделения с падением за счет зоны циркуляции. Для сыпучего материала в режиме без подбрасывания с увеличением  $\omega$  момент  $\psi$  плавно возрастает от начального значения 0,5; с частичным подбрасыванием – принимает максимальное значение; с полным подбрасыванием – интенсивно снижается; при неполном центрифугировании – плавно снижается до нуля.

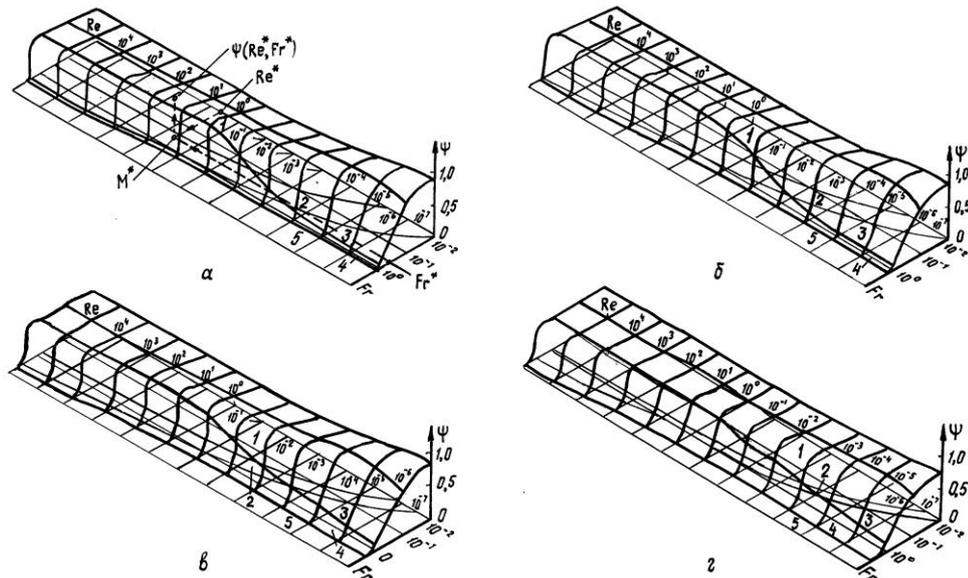


Рис. 5. Универсальные трехпараметрические зависимости относительного момента сопротивления вращению  $\psi$  барабана с сыпучим материалом:  $a - k = 0,3$ ,  $б - 0,5$ ,  $в - 0,7$ ,  $г - 0,9$  (обозначения режимов движения см. на рис. 3)

Таким образом, полученные графические зависимости границ перехода режимов движения легкодеформируемого материала в барабане и момента сопротивления его вращению могут быть использованы для уточнения и прогнозирования параметров привода при реализации оптимальных режимов работы горизонтальных барабанных машин лесной и целлюлозно-бумажной промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованов Ю.В., Ширко И.В. Обзор современного состояния механики быстрых движений гранулированных материалов // Механика гранулирован. сред. Теория быстрых движений. – М.: Мир, 1985. – С. 271–279.
2. Науменко Ю.В. Момент вращения горизонтального цилиндра, частично заполненного вязкой жидкостью // Инженерно-физ. журн. – 1998. – Т. 71, № 4. – С. 639–642.
3. Науменко Ю.В. Момент сопротивления вращению горизонтального цилиндра, частично заполненного сыпучим материалом // Горн. журн. – 1998. – № 5–6. – С. 95–101. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Науменко Ю.В. Режимы движения сыпучего материала в горизонтальном вращающемся цилиндре // Горн. журн. – 1996. – № 2. – С. 105–110.
5. Науменко Ю.В. Скоростные режимы движения вязкой жидкости в горизонтальном вращающемся цилиндре // Инженерно-физ. журн. – 1993. – Т. 64, № 5. – С. 558–565.

6. *Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
7. *Юдин С.Б., Левин М.М., Розенфельд С.Е.* Центробежное литье. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
8. Ball milling / A.M. Gow, M. Huggenheim, A.B. Campbell, W.H. Coghill // Trans. AIMME. – 1934. – Vol. 112. – P. 24–78.
9. Confined flow in a partially-filled rotating horizontal cylinder / A. Hajj-Sheikh, R. Lakshimanarayanan, D.Y.S. Lou, P.J. Ryan // Trans. ASME. Ser. 1. J. Fluids Engng. – 1984. – Vol. 106, N 3. – P. 270–278.
10. *Deiber J.A., Cerro R.L.* Viscous flow with a free surface inside a horizontal rotating drum. 1. Hydrodynamics // Ind. Engng Chem. Fundam. – 1976. – Vol. 15, N 2. – P. 102–110.
11. *Gans R.F., Yalisove S.M.* Observation and measurements of flow in a partially-filled horizontally rotating cylinder // Trans. ASME. Ser. 1. J. Fluids Engng. – 1982. – Vol. 104, N 3. – P. 363–366.
12. *Gavish J., Chadwick R.S., Gutfinger C.* Viscous flow in a partially filled rotating horizontal cylinder // Isr. J. Technol. – 1978. – Vol. 16, N 5-6. – P. 264–272.
13. *Goodman M.A., Cowin S.C.* Two problems in the gravity flow of granular materials // J. Fluid Mech. – 1971. – Vol. 45, N 2. – P. 321–339.
14. *Hukki R.T.* Tumbling mill capacity and power consumption as related to mill speed // Trans. AIMME. – 1954. – Vol. 199. – P. 728–730.
15. *Phillips O.M.* Centrifugal waves // J. Fluid Mech. – 1960. – Vol. 7, N 3. – P. 340–352.
16. *Staud A.* Erkenntnisse bei der kondensatabfuhr aus raschlaufenden trockenzyklindern // Voith Forschung und Konstruktion – 1964. – N 11. – S. 4. 1 – 4. 9.
17. *White R.E., Higgins T.W.* Effect of fluid properties on condensate behavior // TAPPI. – 1958. – Vol. 41, N 2. – P. 71–76.
18. *White R.E.* Residual condensate, condensate behavior, and siphoning in paper driers // TAPPI. – 1956. – Vol. 39, N 4. – P. 228–233.

Ровенский государственный  
технический университет

Поступила 28.12.2000 г.

*Yu.V. Naumenko*

### **Defining Parameters of Horizontal Drum Machine Drive for Forest and Pulp-and-Paper Industry Partially Filled with Treated Material**

Universal graphic dependencies are built based on experimental data taking into account the agreed criteria of motion similarity, to be used for calculating speed and force parameters of horizontal drum machine drives partially filled with liquid and granular treated materials.