

УДК 674.815-41

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ ДРЕВЕСНЫХ ЧАСТИЦ

© С.М. Плотников, д-р техн. наук, проф.

М.С. Лурье, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный технологический университет, ул. Мира, 82,

г. Красноярск, Россия, 660049

E-mail: smplochnikov@rambler.ru

Для минимизации угла укладки частиц в стружечный ковер при изготовлении плит OSB необходимо выбрать оптимальную скорость направляющих элементов ориентирующего устройства, оценив замедление вращения частицы.

С учетом ламинарного характера обтекания древесных частиц воздушной средой был проведен численный эксперимент, в результате которого получены поля скоростей потоков, обтекающих вращающуюся частицу, определен коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, который принимает значения от 1,12 до 1,20. Моделирование проводили для частиц длиной до 150 мм, шириной 4...30 мм, толщиной 0,2...1,0 мм, применяемых в производстве плит OSB.

Имитационное моделирование с помощью пакета Simulink программы MatLab показало, что действующая на вращающуюся частицу погонная сила аэродинамического сопротивления возрастает нелинейно с увеличением размеров частицы, за время ориентирования угловая скорость частиц длиной 150 мм снижается относительно начальной скорости на 18 %, частиц длиной 75 мм – на 12 %. Данное снижение линейно возрастает с уменьшением плотности частиц. Интенсивность замедления плоской частицы при вращении пропорциональна ее толщине, обратно пропорциональна ее плотности и не зависит от размеров частицы по ширине.

Результаты моделирования подтверждены скоростной видеосъемкой.

Угловая скорость частицы, при которой угол ее укладки в ковер минимален, определяется с учетом аэродинамического замедления частицы при падении и вращении, времени разворота (падения) и начального угла схода частицы с направляющих элементов, который зависит от расстояния между элементами и длины частицы.

Уточненное значение скорости вращения крупноразмерных частиц позволит минимизировать угол укладки их в стружечном ковре благодаря приданию частицам соответствующего вращательного импульса. За счет этого можно повысить прочность на изгиб готовых плит OSB.

Ключевые слова: плоская частица, имитационная модель, момент инерции, импульс вращения, коэффициент аэродинамического сопротивления, OSB.

В современном производстве плит из крупноразмерной ориентированной стружки (OSB) используются преимущественно механические ориентирующие устройства. В таких устройствах древесные частицы разворачиваются направляющими элементами (дисками, пластинами, струнами и т.д.), сходят с них и, продолжая разворот, укладываются в стружечный ковер. При

этом плоские частицы падают навстречу среде преимущественно широкой плоскостью.

В результате моделирования поступательного движения частицы в [2] получена зависимость времени ее падения от ее размеров и высоты падения. Было установлено, что данное время зависит от толщины и плотности частицы, но не зависит от ее длины и ширины, причем скорость падения частиц из-за сопротивления воздуха снижается до 20 %, т. е. частицам следует придавать меньшую (на 20 %) угловую скорость.

Частицы вращаются навстречу среде узкой гранью, поэтому площадь их сопротивления уменьшается на порядок. Однако сопротивление воздуха замедляет также разворот частиц, поэтому при ориентировании частицам, напротив, следует придавать большую угловую скорость.

Для уменьшения угла укладки частиц в стружечный ковер необходимо подобрать оптимальную скорость перемещения направляющих элементов ориентирующего устройства, оценив замедление вращения частицы. При этом расчеты падения и вращения частицы в корне отличаются: при падении на частицу действует сила тяжести, при вращении – инерционность частицы. Другим будет и коэффициент лобового сопротивления.

Рассмотрим случай плоской прямоугольной частицы длиной L , шириной B и толщиной h , вращающейся вокруг оси OO^1 с угловой скоростью ω (рис. 1).

Сила аэродинамического сопротивления F по длине частицы будет изменяться, поскольку разные ее участки будут двигаться с разной линейной скоростью относительно воздуха. Рассмотрим бесконечно малый участок частицы длиной dr на расстоянии r от оси вращения. Элементарная сила сопротивления dF , действующая на участок частицы длиной dr и шириной B :

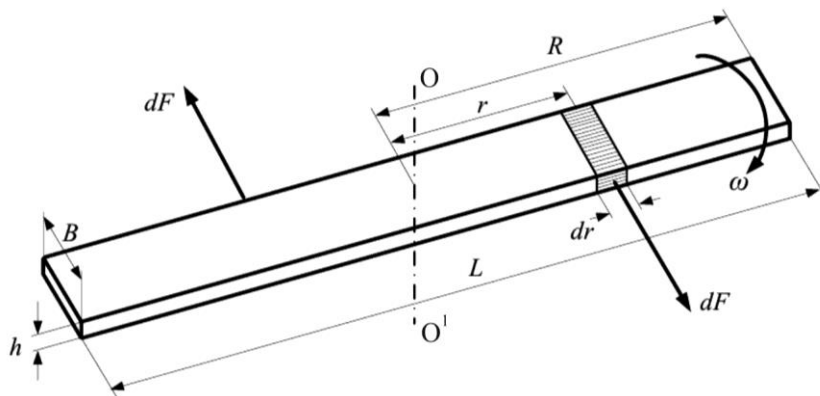


Рис. 1 Свободное вращение частицы прямоугольного сечения в воздухе ($R = L/2$; dF – элементарная сила сопротивления; ω – угловая скорость вращения частицы; r – текущая координата рассматриваемого участка частицы)

$$dF = C_x \rho_b B dr \frac{V_k^2}{2},$$

где C_x – коэффициент аэродинамического (лобового) сопротивления при вращении частицы;

ρ_b – плотность воздушной среды, $\rho_b = 1,29 \text{ кг/м}^3$;

V_k – линейная скорость перемещения краев частицы, м/с.

Выразив линейную скорость через угловую $V_k = r \omega$, получим

$$dF = C_x \rho_b B dr \frac{\omega^2 r^2}{2}. \quad (1)$$

Поскольку длина частицы в десятки раз больше ее поперечных размеров, то для сокращения машинного времени моделирования решалась плоская задача, при которой аэродинамическое сопротивление на концах частицы не учитывалось. Это приводит к погрешности не более 2 ... 3 %.

Особенность движения частиц в механических ориентирующих устройствах – ламинарный характер обтекания частиц воздушной средой. Так, для характерных размеров частиц (длина – до 150 мм, ширина – до 30 мм, толщина – до 1,0 мм) [4] при вращении с угловой скоростью 1...8 рад/с число Рейнольдса $Re = 10...800$, что соответствует ламинарному режиму.

Ламинарный режим движения однородных сред и их взаимодействие с обтекаемыми телами хорошо подчиняется численным методам расчета, поэтому для определения коэффициента C_x был применен численный эксперимент, состоящий из следующих шагов:

производится расчет стационарного процесса движения частицы в потоке воздуха при нормальных условиях методом численного моделирования с помощью программы Comsol Multiphysics 3.5. Для того чтобы в процессе 2D-моделирования учесть длину частицы, при постпроцессорной обработке результатов определялась погонная сила (F/L , Н/м), действующая на обтекаемое тело в направлении, противоположном движению частицы;

по рассчитанному значению погонной силы определяется коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

результаты, полученные для частиц близкой формы, усредняются;

усредненные результаты аппроксимируются аналитическими выражениями, которые будут пригодны для дальнейших расчетов.

Сила взаимодействия потока с обтекаемым им телом описывается следующей формулой [1]:

$$\frac{F}{L} = C_x \rho_b B \frac{V_k^2}{2}.$$

Тогда может быть найден коэффициент аэродинамического сопротивления:

$$C_x = \frac{\left(\frac{F}{L}\right)}{\rho_b B \frac{V_k^2}{2}} = \frac{2\left(\frac{F}{L}\right)}{\rho_b B V_k^2}. \quad (2)$$

Элементарный тормозящий момент с учетом силы, действующей на вторую половину частицы,

$$dM = 2dF \cdot r = Cx \rho_b B \omega^2 r^3 dr. \quad (3)$$

Для определения суммарного тормозящего момента необходимо проинтегрировать выражение (3) по длине частицы от оси вращения до ее конца:

$$M = \int_0^R dM = \int_0^R Cx \rho_b B \omega^2 r^3 dr = \rho_b B \omega^2 \int_0^R Cx r^3 dr = K \int_0^R Cx r^3 dr, \quad (4)$$

где $K = \rho_b B \omega^2$.

Коэффициент аэродинамического сопротивления Cx в (4) зависит от скорости движения частицы относительно воздуха, которая, в свою очередь, определяется текущей координатой рассматриваемого участка r и угловой скоростью ω . Для общности последующих выводов будем считать, что коэффициент Cx имеет следующий вид:

$$Cx = A + \frac{C}{\sqrt{V}} = A + \frac{C}{\sqrt{\omega r}} = A + \frac{C}{\sqrt{\omega} \sqrt{r}}. \quad (5)$$

При моделировании частицы шириной $B = 4; 15$ и 25 мм и толщиной $h = 0,2; 0,5$ и $1,0$ мм располагались широкой стороной вдоль и поперек потока. Пример полученных зависимостей погонной силы от скорости вращения частиц приведен на рис. 2.

После расчета по выражению (2), усреднения результатов и аппроксимации кривых средствами программы MatLab получены выражения, позволяющие для каждой из групп частиц определять коэффициент Cx с точностью до 10 %.

Для частиц, расположенных шириной B вдоль и поперек потока, соответственно имеем:

$$Cx^B = -3,4490 + \frac{407,1400}{\sqrt{Re}}; \quad Cx^П = 1,3293 + \frac{2,5227}{\sqrt{Re}}. \quad (6)$$

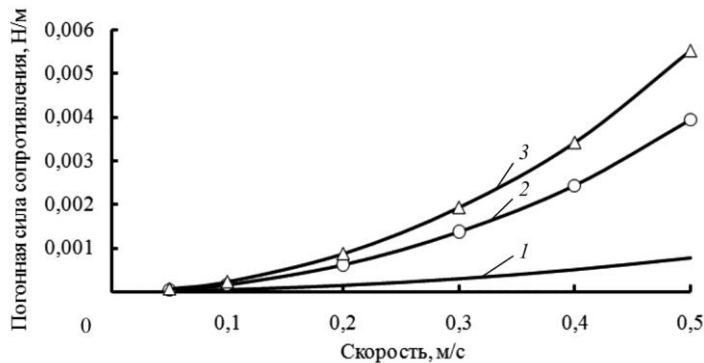


Рис. 2. Погонная сила, действующая на частицы разной ширины: 1 – 4 мм; 2 – 15 мм; 3 – 25 мм

Выражения (6) получены для аргумента, которым является число Рейнольдса. Это общепринятый критерий движения потоков среды, однако для практического расчета движения древесных частиц в системах ориентирования он неудобен, так как скрытно содержит размеры частиц и их скорость, которые приходится аналитически интегрировать в процессе расчета. В нашем частном случае для последующего анализа удобнее выразить C_x как функцию скорости движения частиц относительно воздуха. Для частиц, расположенных шириной B вдоль и поперек потока, имеем соответственно:

$$C_x^B = -3,4490 + \frac{11,2180}{\sqrt{V}}; \quad C_x^H = 1,2380 + \frac{0,1500}{\sqrt{V}}.$$

Подставив (5) в (4), получим:

$$M = K \int_0^R A r^3 dr + K \int_0^R \frac{C}{\sqrt{\omega} \sqrt{r}} r^3 dr = K A \int_0^R r^3 dr + \frac{K C}{\sqrt{\omega}} \int_0^R \frac{r^3}{\sqrt{r}} dr. \quad (7)$$

Выражение (7) содержит два интеграла:

$$\int_0^R r^3 dr = \frac{R^4}{4}; \quad \int_0^R \frac{r^3}{\sqrt{r}} dr = \frac{2}{7} R^3 \sqrt{R}. \quad (8)$$

Подставим (8) в (7):

$$M = \frac{K A R^4}{4} + \frac{2K C R^3 \sqrt{R}}{7\sqrt{\omega}}.$$

Тогда из (7) получим выражение тормозящего момента:

$$M = \frac{\rho_B B A R^4}{4} \omega^2 + \frac{2\rho_B B C R^3 \sqrt{R}}{7} \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega}}. \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$$a = \frac{\rho_B B A R^4}{4}; \quad b = \frac{2\rho_B B C R^3 \sqrt{R}}{7}. \quad (10)$$

Тогда зависимость аэродинамического момента торможения от размеров частицы и ее угловой скорости примет окончательный вид:

$$M = a\omega^2 + b \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega}}. \quad (11)$$

Для определения закона движения частицы, запишем второй закон Ньютона для вращающейся частицы:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M, \quad (12)$$

где J – момент инерции частицы относительно оси OO^1 , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Для пластины массой m и длиной L момент инерции по [3]

$$J = \frac{1}{12} m L^2 = \frac{1}{12} m (2R)^2 = \frac{m R^2}{3}. \quad (13)$$

Массу частицы определим по известной формуле

$$m = B L h \rho_{\text{ч}}, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы, $\rho_{\text{ч}} = 400 \dots 700 \text{ кг/м}^3$.

Подставим (13) и (11) в (12):

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{3}{mR^2} \left(a\omega^2 + b\frac{\omega^2}{\omega} \right). \quad (15)$$

После интегрирования обеих частей дифференциального уравнения (15) получим

$$\omega = -\frac{3}{mR^2} \int \left(a\omega^2 + b\frac{\omega^2}{\sqrt{\omega}} \right) dt. \quad (16)$$

Масса частицы m не входит в коэффициенты уравнения (10), поэтому, согласно (16), она определяет скорость вращения частицы в обратной пропорции.

Уравнение (16) нелинейно, поэтому для его интегрирования применим численные методы – имитационное моделирование с помощью пакета Simulink программы MatLab. Общий вид модели для плоских частиц представлен на рис. 3.

Блок подготовки данных вычисляет коэффициенты уравнения (16), блок решения дифференциальных уравнений решает (16), интегрируя его правую часть. Блок обработки данных вычисляет угловую скорость частицы во времени. При этом вычисляются два значения углового отклонения частицы: с учетом сил аэродинамического торможения и без учета данных сил (идеальное). Данные значения индицируются на дисплеях Angle_degrees (в градусах)

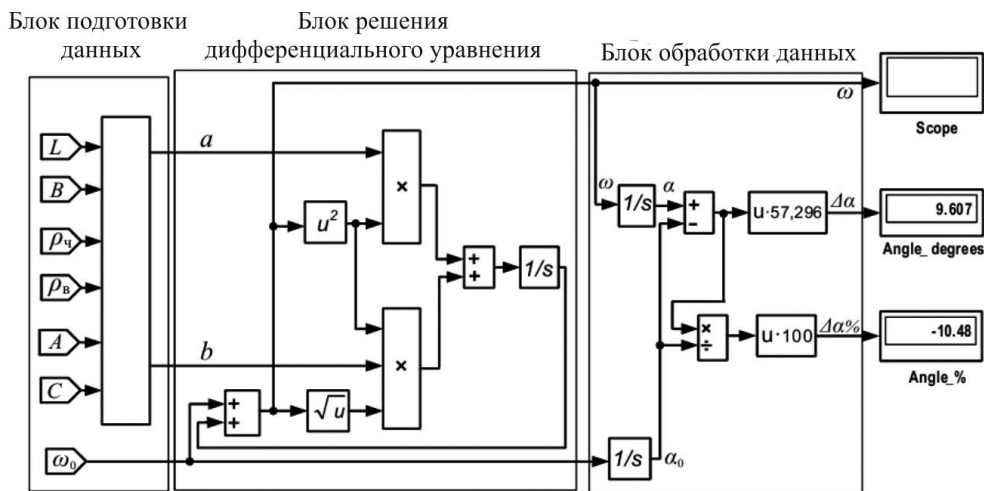


Рис. 3. Имитационная модель вращения плоской частицы

и Angle_% (в процентах от идеального значения). Осциллограф Score показывает процесс изменения угловой скорости при движении частицы во времени.

Моделирование проводили для плотности воздуха $1,204 \text{ кг/м}^3$, его кинематической вязкости $1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и плотности частицы 400 кг/м^3 .

Толщина B частицы, встречающей поток, не влияет на замедление частицы при вращении. Это следует из выражений (10) и (11). Коэффициенты a и b в выражении (10) прямо пропорциональны ширине частицы B . Но масса плоской частицы, определяемая по формуле (14), в формуле момента инерции (13) также пропорциональна ширине частицы B .

Учитывая, что $R = L/2$, проведем сокращения:

$$\omega = -\frac{12}{h \rho_{\text{ч}}} \int_0^R \left(\frac{\rho_{\text{в}} A L^3}{16} \omega^2 + \frac{\rho_{\text{в}} C L^2 \sqrt{L}}{7\sqrt{2}} \frac{\omega^2}{\sqrt{\omega}} \right) dt. \quad (17)$$

Толщина частицы h оказывает влияние на скорость замедления. Чем она больше, тем меньше замедляет вращение частица. Это можно объяснить тем, что увеличение h приводит к росту момента инерции частицы, но мало влияет на аэродинамическое сопротивление. Однако следует учитывать, что вследствие повышения площади трения частицы о воздух с увеличением ее толщины h аэродинамическая сила торможения также несколько возрастает. Это приводит к увеличению скорости торможения частицы.

Полученные в результате численного эксперимента поля скоростей потоков при обтекании вращающейся частицы (без учета ее падения) представлены на рис. 4, графики изменения угловой скорости частицы – на рис. 5.

Результаты моделирования показали, что при вращении частицы действующая на нее погонная сила аэродинамического сопротивления возрастает нелинейно с увеличением размеров частицы. Угловая скорость частиц снижается относительно начальной скорости по закону, близкому к линейному, причем за время ориентирования для частиц длиной 150 мм угловая скорость снижается на 20 %, для частиц длиной 75 мм – на 12 %. Данное снижение линейно возрастает с уменьшением плотности частиц.

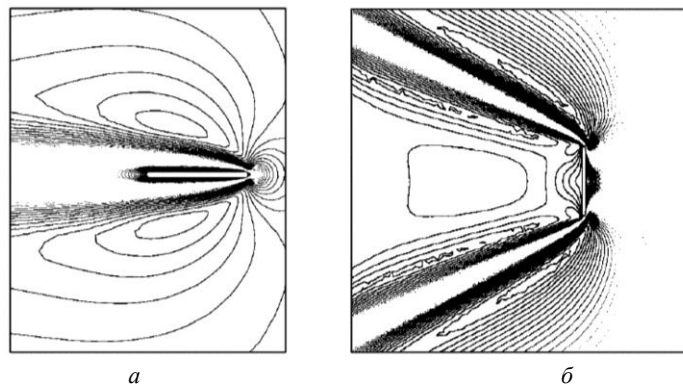


Рис. 4. Поля скоростей потоков, обтекающих частицу с параметрами $B = 20 \text{ мм}$, $h = 0,7 \text{ мм}$: a – плоскость частицы расположена вдоль потока; b – поперек потока

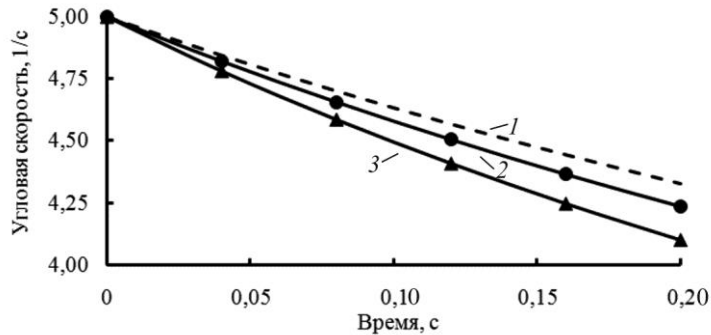


Рис. 5. Зависимость $\omega = f(t)$ для частицы с параметрами $B = 20$ мм, $h = 0,5$ мм, движущейся узкой гранью навстречу потоку, при разной ее длине: 1 – 75 мм; 2 – 100 мм; 3 – 150 мм

Полученные результаты экспериментально проверены с помощью скоростной цифровой видеокамеры Fastvideo-400 путем фиксации (вид сверху) вращения частицы из древесины сосны длиной 75 и 150 см, шириной 25 см, толщиной 0,07 см при падении ее с высоты 0,5 м. Начальная угловая скорость задавалась встречным перемещением двух направляющих элементов, на которых находилась частица, и составляла 50 об/мин (5,2 рад/с). При $L = 150$ см усредненная конечная скорость вращения частиц составила 4,12 рад/с, при $L = 75$ см – 4,52 рад/с, т. е. замедление вращения частиц соответствовало полученным при моделировании результатам с погрешностью, не превышающей 5 %.

Таким образом, угловую скорость частицы (ω , рад/с), при которой угол ее укладки в ковер минимален, можно определить из следующего выражения:

$$\omega = \frac{k_v}{k_n} \frac{2\pi n + \alpha_{\text{нач}}}{T_o}, \quad (18)$$

где k_v, k_n – аэродинамические коэффициенты, учитывающие замедление частицы соответственно при вращении и падении;

n – число оборотов, задаваемое частице;

$\alpha_{\text{нач}}$ – угол схода частицы с направляющих, зависящий от расстояния между направляющими и длины частицы, рад;

T_o – время падения (разворота) частицы, с.

Согласно [2], можно принять $k_v = 1,2$, тогда коэффициент k_n принимает значения от 1,12 до 1,20 и зависит от размеров частиц, их плотности, начальной скорости вращения и времени разворота T_o , которое пропорционально высоте ориентирующего устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 7-е изд. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. *Плотников С.М., Лурье М.С.* Моделирование движения плоской древесной частицы при ориентировании // Лесн. журн. 2012. № 6. С. 89–95. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. *Фаворин М.В.* Моменты инерции тел.: справ. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 514 с.
4. *Thoeten H., Irle M., Sernek M.* Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists // Brunel University Press. London, 2010. 283 s.

Поступила 18.03.13

Modeling of the Rotational Motion of Large-Sized Wood Particles

Plotnikov S.M., Doctor of Engineering, Professor

Lurie M.S., Doctor of Engineering, Professor

Siberian State Technological University, Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049, Russia

E-mail: smplotnikov@rambler.ru

For the angle minimization of particles packing in shaving mat at the OSB manufacturing the optimal velocity of orienting tool directional elements must be chosen, considering the deceleration of particle rotation.

Taking into account the laminar streamline of air wood particles the numerical experiment was run. As a result the velocity field of flow around rotating particle is received, the particle aerodynamic drag coefficient is defined, which takes values from 1.12 to 1.20. The modeling was carried out for the particles, used in the manufacture of OSB, with a length of 150 mm, a width of 4...30 mm, a thickness of 0.2...1 mm.

Service simulating test with the packaged programs MatLab Simulink showed that actuating linear aerodynamic drag force during the rotation of particles increases nonlinearly with the augment of particle size. During the orientation the angular rate of the particle with length of 150 mm decreases comparatively to the initial velocity by 18%, and the particles with length 75 mm – by 12%. This degradation increases linearly with decreasing density of particles. Deceleration intensity of the flat particles during rotation is proportional to its thickness, is inversely to its compactness and is not dependent on the width of the particle.

The modeling results is substantiated by speed camera shooting.

The angular rate of the particles, which has the minimal angle of laying in the mat, is determined subject to the aerodynamic deceleration of the particles from falling and rotation, turning (falling) time, and the initial descent of the particles from the directional elements, which depends on the distance between the elements and the particle length.

Improved value of the rotational velocity of large-sized particles minimizes stacking angle them in shaving mat owing to impart the angular impulse. This increases the flexural strength of the finished OSB.

Keywords: flat particle, simulation model, moment of inertia, angular impulse, aerodynamic drag coefficient, OSB.

REFERENCES

1. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Moscow, 2003. 840 p.
 2. Plotnikov S.M., Lur'e M.S. Modelirovanie dvizheniya ploskoy drevesnoy chastitsy pri orientirovanii [Modeling of a Flat Wood Particle Motion During Alignment]. *Lesnoy zhurnal*, 2012, no. 6, pp. 89-95.
 3. Favorin M.V. *Momenty inertsii tel* [Inertial Moments of Objects]. Moscow, 1977. 514 p.
 4. Thoemen H., Irle M., Sernek M. *Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists*. London, 2010. 283 p.
-
-