

Силу F_t определяют с учетом среднего угла встречи ψ_{cp} для всей поверхности среза на бревне. Угол ψ_{cp} вычисляют по формуле (12), где можно принять:

$$R_s = R_{cp} = R_z + 0,4H \operatorname{ctg} \varphi_n. \quad (19)$$

Здесь φ_n — угол наклона ножа; $\varphi_n = \varepsilon_{ш}$.

Если бревно при обработке проходит через центр фрезы, то значение a рекомендуют принимать как среднее из трех значений, полученных при $\psi_{вх}$, $\psi_{вых}$, ψ_{cp} для условного ножа, имеющего радиус R_{cp} .

$$A = 0,25 \left(a_6^2 \operatorname{arccos} \frac{H_6}{a_6} - H_6 \sqrt{a_6^2 - H_6^2} \right); \quad (20)$$

$$u_{об} = l_{ш} K.$$

Следует отметить, что в этих методах расчета значения F_t или a принимают на основании экспериментальных данных. Но в зависимости от методики эксперимента эти значения могут быть или «чистой» силой, или «чистой» удельной работой резания, или включать в себя дополнительные сопротивления при фрезеровании: на сообщение срезанной щепе кинетической энергии при выбросе, сопротивления от различных видов трения щепы и бревна о фрезу и др. Поэтому в случае необходимости при расчете моментов и мощностей дополнительные сопротивления учитывают введением специальных поправочных коэффициентов. $K_d = 1,1—1,3$, большие значения которых соответствуют обработке тонких бревен и возможности их самозатягивания в машину при подаче.

Опыт показывает, что расчеты по приведенным методикам дают результаты, близкие к фактическим данным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Боровиков Е. М., Шестаков В. В. Определение мощности фрезерования бревен торцово-коническими фрезами. — В. кн.: Машины и инструменты деревообрабатывающих производств. Л.: ЛТА, 1981, вып. 8, с. 42—44. [2]. Кадури И. Исследоване на някои енергетични показатели при преработване на иглолистни трупи с фрезерно-призмичащи машини: Науч. тр./ Н.-и. проект. конструкт. и технолог. ин-т дървообработ. промыш.—София, 1980, № 6, с. 45—52. [3]. Тимофеев Н. И. Дисковые фрезы для окантовки бревен с получением технологической щепы: Тез. докл. к науч.-техн. совещанию молодых специалистов отрасли по производству деревообрабатывающего оборудования. — М.: ВНИИДМАШ, 1969, с. 10—24. [4]. Тимофеев Н. И. Геометрия дисковых фрез для окантовки бревен. — Изв. высш. учеб. заведений. Лесн. журн., 1971, № 4, с. 67—71. [5]. Тимофеев Н. И. Исследование инструмента дискового типа для получения технологической щепы при окантовке бревен фрезерованием: Дис. . . канд. техн. наук. — Львов, 1971. — 182 с.

Поступила 3 мая 1984 г.

УДК 62-493 : 630*363.7

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЩЕПЫ В ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ БОКОВОМ ЕЕ УДАЛЕНИИ ИЗ ДИСКОВОЙ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Л. Г. НЕВЗОРОВА, Э. М. ЛАУТНЕР

Архангельский лесотехнический институт
Ленинградская лесотехническая академия

В деревообрабатывающей и лесной промышленности, наряду с дисковыми рубительными машинами с верхним или нижним удалением щепы, начали эксплуатироваться машины с боковым удалением щепы. Основная особенность их — удаление щепы через боковой щепопровод

без удара о конструктивные элементы машины; это приводит к снижению шума машины, а также к уменьшению потерь древесины в виде мелочи и непригодных для ЦБП опилок. При использовании бокового щепопотода нет необходимости его дополнительно оборудовать (конвейеры, воздуходувки, вентиляторы) с целью удаления щепы из машины и дальнейшего транспортирования: щепа попадает и перемещается по трубопроводу за счет энергии упругих сил древесины, приобретенной в процессе рубки. Нами проведено исследование движения щепы по трубопроводу.

Совокупность движущихся по трубопроводу щепы и воздуха представляет собой двухкомпонентный поток. Существуют различные методы исследования движения таких потоков. При построении феноменологических моделей производится переход от реальной дисперсной структуры потока к течению фиктивных непрерывных сред. Такой подход удобен для описания мелкодисперсных трубных течений. Статистические модели основаны на введении функций распределения как для частиц материала, так и для молекул газа, и на получении соответствующих кинетических уравнений. Щепа, выбрасываемая из рубительной машины, представляет собой полидисперсный ансамбль частиц, включающий 90—92 % нормальной, 1—2 % крупной, 3—5 % мелкой фракции и опилок (ГОСТ 15815—70). Двухкомпонентный поток типа щепа — воздух является грубодисперсной гетерогенной системой с существенной неоднородностью, поэтому перечисленные выше модели неприменимы для описания подобных потоков [1]. Исследуя движение смеси, следует рассматривать движение отдельных частиц под действием ряда сил и их взаимодействие со стенкой трубопровода, так как особенности поведения двухкомпонентного потока определяются, прежде всего, движением дисперсного вещества [1, 9].

В отличие от процесса пневмотранспортирования, когда частицы перемещаются по трубопроводу воздушным потоком, движение частиц, выбрасываемых из рубительной машины, происходит за счет энергии упругих сил древесины. Поскольку эта энергия расходуется на преодоление сил сопротивления, движение щепы в некоторый момент времени переходит в неустойчивое, вследствие выпадения частиц на дно. Поэтому использование существующих моделей движения двухкомпонентных потоков [9, 10], разработанных для устойчивых режимов, не представляется возможным.

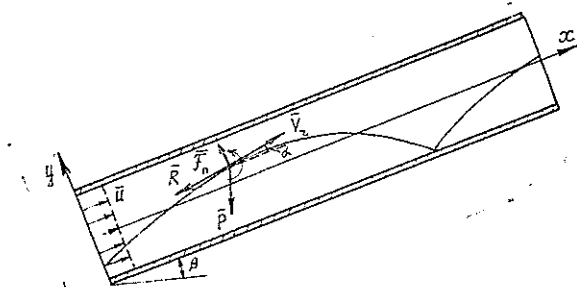


Рис. 1. Движение единичной щепы в трубопроводе, наклонном к горизонту под углом β .

Рассмотрим движение единичной частицы в потоке щепы, выбрасываемой в трубопровод (рис. 1), при следующих допущениях: 1) эффект взаимодействия частиц между собой пренебрежимо мал; 2) на частицу действуют [10] сила тяжести, сила аэродинамического сопротивления $R = 0,5 c_s \rho v_r^2$, подъемная сила $F_n = 0,5 c_n s \rho v_r^2$, возникающая вследствие вращения частицы (c — коэффициент аэродинамического сопротивления; c_n — коэффициент подъемной силы; s — площадь миделева сечения частицы;

ρ — плотность воздуха; v_r — относительная скорость частицы). Сведений о коэффициенте подъемной силы c_n для щепы в литературе мы не обнаружили. Используя экспериментальные данные о движении тел, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда [8], можно прийти к заключению, что этот коэффициент невелик ($c_n \approx 0,3 - 0,5$), поэтому действием подъемной силы на частицы, находящиеся вдали от стенки, можно пренебречь. Однако когда частица приближается к стенке трубопровода, она попадает в иные условия. Экранирующее влияние внутренней поверхности трубопровода проявляется в увеличении c_n аналогично тому, как увеличивается коэффициент подъемной силы крыла самолета при приближении его к земле [2, 6]. Поэтому вблизи стенки трубопровода влияние подъемной силы на движение щепы необходимо учитывать. Если после удара о нижнюю стенку подъемная сила достаточно велика, то частица отскакивает от стенки трубопровода. Под действием силы тяжести вертикальная составляющая скорости постепенно уменьшается и частица вновь возвращается в пристенную область. Этим и объясняется скачкообразный характер движения частиц в двухкомпонентном потоке, наблюдаемый в экспериментах [9, 10]. При небольших относительных скоростях подъемная сила не превышает силу тяжести частицы, и последняя, пролетев некоторое расстояние, вскоре начинает скользить или перекаатываться по дну трубопровода.

Проанализируем движение единичной щепы на двух этапах: 1) скачкообразное движение частицы вдоль щепопровода; 2) скольжение ее по дну.

На первом этапе дифференциальные уравнения движения частицы в наклоненном к горизонту трубопроводе имеют вид

$$m\ddot{x} = -0,5c_n \rho v_r^2 \cos \alpha \pm 0,5c_n \rho v_r^2 \sin \alpha - mg \sin \beta; \quad (1a)$$

$$m\ddot{y} = -0,5c_n \rho v_r^2 \sin \alpha \pm 0,5c_n \rho v_r^2 \cos \alpha - mg \cos \beta. \quad (1б)$$

Начальные условия: $t = 0$, $x = 0$, $y = y_0$, $\dot{x} = v_{0x}$, $\dot{y} = y_{0y}$.
Разделив уравнения на m , получим:

$$\ddot{x} = -[k(\dot{x} - u) \pm n\dot{y}] \sqrt{(\dot{x} - u)^2 + \dot{y}^2} - g \sin \beta; \quad (2a)$$

$$\ddot{y} = -[k\dot{y} \pm n(\dot{x} - u)] \sqrt{(\dot{x} - u)^2 + \dot{y}^2} - g \cos \beta, \quad (2б)$$

где $k = 0,5 c_n \rho / m$ — баллистический коэффициент;

$n = 0,5 c_n \rho / m$ — коэффициент витания;

u — скорость воздуха в трубопроводе;

$$\dot{x} - u = v_r \cos \alpha; \quad \dot{y} = v_r \sin \alpha; \quad \sqrt{(\dot{x} - u)^2 + \dot{y}^2} = v_r.$$

Величина баллистического коэффициента определена экспериментально [7]. Коэффициент подъемной силы, а следовательно, коэффициент витания n для частиц, находящихся вдали от стенки, полагаем равным нулю. Для частиц, находящихся в пристенном слое, величина n неизвестна, однако ее можно определить косвенно. Преобразовывая совместно формулы $k = 0,5 c_n \rho / m$ и $n = 0,5 c_n \rho / m$, получим

$$n = \frac{c_n}{c} k.$$

Исследуя на математической модели движение частиц с различными значениями k , определили, что при $\frac{c_n}{c} = 1,5$ результаты расчета согласуются с известными положениями теории и практики пневмотранспортирования щепы, а именно: при небольших скоростях воздуха, близких к скорости трогания, частицы движутся, часто соприкасаясь с дном трубопровода, и их скорость значительно меньше скорости воздуха u (отношение $\frac{v}{u} \approx 0,5 - 0,6$); при увеличении скорости воздуха частицы движутся скачкообразно по пологим параболическим траекториям, отношение $\frac{v}{u}$ достигает максимального значения, равного 0,8, и далее остается постоянным.

Для определения положения частицы и ее скорости на первом этапе движения необходимо проинтегрировать систему дифференциальных уравнений (2а), (2б) каким-либо численным методом, например, методом Рунге — Кутты. Проекции скорости частицы после удара о стенку определяются соотношениями:

$$v'_x = k_\tau v_x; \quad v'_y = k_n v_y,$$

где k_n и k_τ — коэффициенты восстановления нормальной и тангенциальной составляющих скорости.

Если после удара относительная скорость частицы невелика и подъемная сила не превышает силу тяжести частицы, последняя начинает скользить по дну трубопровода.

На втором этапе, в отличие от первого, на единичную щепу действует сила трения скольжения; подъемная сила при скольжении невелика, и ею пренебрегаем. Дифференциальное уравнение движения частицы имеет вид

$$m\ddot{x} = -0,5cspv_r^2 - fmg \cos \beta - mg \sin \beta. \quad (3)$$

Начальные условия: $t = t_1, x = x_1, \dot{x} = v_1$.

После деления уравнения (3) на m получим

$$\ddot{x} = -k(v-u)|v-u| - g(f \cos \beta + \sin \beta), \quad (4)$$

где f — коэффициент трения скольжения;
 v — абсолютная скорость частицы.

Форма записи первого слагаемого в правой части уравнения (4) учитывает то обстоятельство, что при $v = u$ сила аэродинамического сопротивления меняет знак. Рассмотрим два случая: 1) скорость щепы в начале скольжения больше скорости воздуха; 2) скорость щепы в начале скольжения меньше скорости воздуха.

В первом случае, при $v_1 > u$, дифференциальное уравнение движения частицы (4) примет вид:

$$\ddot{x} = -k(v-u)^2 - g(f \cos \beta + \sin \beta). \quad (5)$$

Преобразовав уравнение (5) и обозначив $\sqrt{\frac{g(f \cos \beta + \sin \beta)}{k}} = r$,
имеем,

$$\ddot{x} = -k[r^2 + (v-u)^2]. \quad (6)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим:

$$v = u + r \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \frac{v_1 - u}{r} - kr(t - t_1) \right]; \quad (7)$$

$$x = x_1 + u(t - t_1) + \frac{1}{k} \ln \left| \frac{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{v_1 - u}{r} \right) - kr(t - t_1)}{\cos \operatorname{arctg} \frac{v_1 - u}{r}} \right|, \quad (8)$$

где x_1, v_1 — координата и скорость частицы в момент начала скольжения t_1 .

Уравнения (7), (8) применимы до того момента, когда скорость частицы станет равной скорости воздуха u . Это произойдет при $t_2 = t_1 + \frac{1}{kr} \operatorname{arctg} \frac{v_1 - u}{r}$. Дальнейшее скольжение частицы описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{x} = k[(u-v)^2 - r^2]. \quad (9)$$

После интегрирования уравнения (9) имеем

$$v = u - r \frac{1 - e^{-2kr(t-t_2)}}{1 + e^{-2kr(t-t_2)}}; \quad (10)$$

$$x = x_2 + (u - r)(t - t_2) - \frac{1}{k} \ln \frac{1 + e^{-2kr(t-t_2)}}{2}, \quad (11)$$

где x_2 — координата частицы в момент t_2 .

Скорость частицы уменьшается, асимптотически приближаясь к значению $u - r$.

При $r > u$ частица остановится в момент $t_{\text{ост}} = \frac{1}{2kr} \ln \frac{r+u}{r-u} + t_2$.

Во втором случае, при $v_1 < u$, дифференциальное уравнение и начальные условия движения частицы имеют вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= k[(u - v)^2 - r^2]; \\ t &= t_1, \quad x = x_1, \quad v = v_1. \end{aligned} \quad (12)$$

После интегрирования получим

$$v = u - r \frac{1 - ae^{-2kr(t-t_1)}}{1 + ae^{-2kr(t-t_1)}}; \quad (13)$$

$$x = x_1 + (u - r)(t - t_1) - \frac{1}{k} \ln \frac{a + e^{-2kr(t-t_1)}}{a + 1}, \quad (14)$$

где $a = \frac{r - u + v_1}{r + u - v_1}$.

Предельное значение скорости равно $u - r$. Если $u < r$, то частица через некоторое время остановится.

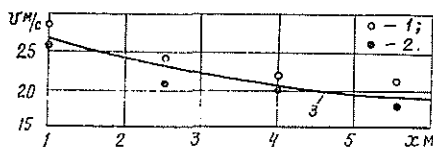
Движение потока щепы, выбрасываемой из рубительной машины в трубопровод, рассмотрим как движение совокупности частиц различного размера. Движение единичной щепы в заданном поле скоростей воздуха определяется начальной скоростью, начальными координатами частицы, баллистическим коэффициентом. Для всех частиц потока эти величины случайные. Поскольку на движение единичных частиц влияют случайные факторы, процесс движения их совокупности не может быть смоделирован полностью детерминистской моделью. Поэтому воспользуемся методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) [4].

Моделирование движения потока щепы проводят в определенном порядке. Вначале по известным правилам [3] разыгрывают случайные величины: начальные координаты, скорость, баллистический коэффициент частицы. После определения начальных параметров рассчитывают движение частицы в соответствии с предложенной математической моделью. По достижении x значения, равного длине трубопровода, или при остановке частицы переходим к следующей попытке — разыгрыванию начальных параметров и расчету движения очередной частицы. Таким образом моделируется движение N частиц. На печатающее устройство ЭВМ выводятся для каждой частицы: значения координат и скоростей в некоторых фиксированных сечениях трубопровода; расстояние от входного сечения, на котором началось скольжение частицы; расстояние, на котором скользящая частица остановилась. На основе полученных данных можно определить, каково распределение скоростей частиц в различных сечениях трубопровода, какое количество щепы находится на первом этапе (полет) и на втором этапе движения (скольжение).

Результаты экспериментального определения скоростей щепы в различных сечениях щепопровода дисковой рубительной машины с бо-

Рис. 2. Изменение скорости движения щепы вдоль трубопровода при $u = 10$ м/с, $k = 0,3$ м⁻¹ (береза, $\rho = 890$ кг/м³).

1 — опыт 1; 2 — опыт 2; 3 — теоретическая кривая.



ковым выбросом щепы [5] подтверждают приемлемость предлагаемой математической модели. На рис. 2 изображены зависимость средней скорости щепы v от расстояния x , полученная расчетным путем, а также опытные значения средней скорости щепы в некоторых сечениях трубопровода, определенные методом скоростной киносъемки. Удовлетворительное согласование результатов теоретического и экспериментального определения скоростей частиц позволяет сделать вывод о возможности применения полученной модели к исследованию движения щепы при боковом удалении ее из дисковой рубительной машины. Результаты необходимы для проектирования и привязки подобных рубительных машин в технологические потоки деревообрабатывающих предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Воронин Ю. Б. Пневмотранспорт измельченной древесины. — М.: Лесн. пром-сть, 1977. — 207 с. [2]. Горощенко Б. Т. Динамика расчета самолета. — М.: Оборонгиз, 1954. — 335 с. [3]. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Высш. школа, 1977. — 478 с. [4]. Ермаков С. М. Курс статистического моделирования. — М.: Наука, 1976. — 316 с. [5]. Лаутнер Э. М., Невзорова Л. Г. Экспериментальное исследование перемещения щепы в щепопроводе дисковой рубительной машины с боковым выбросом щепы. — Межвуз. сб. науч. тр.: Станки и инструменты деревообрабатывающих производств. Л.: ЛТА, 1982, вып. 9, с. 114—118. [6]. Лигум Т. И. Аэродинамика и динамика полета турбореактивных самолетов. — М.: Транспорт, 1979. — 319 с. [7]. Невзорова Л. Г., Лаутнер Э. М. Экспериментальное определение баллистического коэффициента щепы. — Изв. высш. учеб. заведений, Лесн. журн., 1984, № 1, с. 59—62. [8]. Порех М., Рэй Р. Н. О движении тел, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда. — В кн.: Теоретические основы инженерных расчетов, 1979, № 2. М.: Мир, с. 117—124. [9]. Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. — Киев: Наукова думка, 1980. — 251 с. [10]. Matsumoto S., Saito S., Maeda S. Simulation of gas-solid two-phase flow in horizontal pipe. — Journal of chemical engineering of Japan. 1976, v. 3, N 1, p. 23—28.

Поступила 6 июня 1983 г.

УДК 533.6.011

О РАСЧЕТЕ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ В ЦИКЛОННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ

Э. Н. САБУРОВ, С. И. ОСТАШЕВ

Архангельский лесотехнический институт

В работах [3, 4] рассмотрены общие особенности аэродинамики циклонных камер кольцевого поперечного сечения. Эти устройства обладают большими возможностями для интенсификации процессов тепло- и массообмена. Перспективность их применения в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности в качестве сушильных, нагревательных и охлаждающих устройств, рекуператоров и т. д.