

## Методика определения жесткости балансов, результаты численных экспериментов и испытаний образцов

Ю. В. Никонова<sup>1</sup>  
М. И. Раковская

*Петрозаводский государственный университет*

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены материалы ранее выполненных исследований, связанных с определением сил контактного взаимодействия балансов, подвергаемых очистке в корообдирочном барабане. Под балансом в данной работе понимаются круглые сортаменты, предназначенные для производства древесноволокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажной промышленности. Основное внимание уделяется вопросам определения жесткости балансов.

**Ключевые слова:** балансы, жесткость, математическая модель, силы контактного взаимодействия, корообдирочный барабан.

### SUMMARY

This paper presents material previously performed studies regarding the definition of the forces of contact interaction of the balance being treated in debarking drum. Under the balance in this paper refers round assortments intended for the production of wood-fiber semi-finished products in the pulp and paper industry. The focus is on determining the rigidity balance.

**Keywords:** balances, rigidity, mathematical model, the forces of contact interaction, debarking drum.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Жесткость определяется в механике как способность упругого тела сопротивляться появлению деформаций (растяжения, сжатия, изгиба, сдвига, кручения) [16, 18]. Жесткость тела зависит от формы и размеров тела, а также от материала, из которого оно изготовлено.

Из одного и того же материала могут быть изготовлены элементы различной жесткости. Представляет интерес зависимость жесткости баланса от величины его диаметра, от модулей упругости коры и древесины, возраста, влажности и других физико-математических характеристик.

Мерой жесткости служит отношение силового фактора к той деформации, которая вызывается его действием. При малых деформациях (в пределах выполнения закона Гука) эта зависимость линейна.

В математической модели соударений балансов в процессе их очистки в корообдирочном барабане используется понятие «жесткость при сжатии». Под этим понимается коэффициент пропорциональности между силой, действующей на баланс, и соответствующим ей линейным перемещением. Более того, поскольку соударения балансов сопровождаются образованием так называемого пятна контакта, указанная жесткость может приводиться к единице его длины и иметь размерность  $(Н/м)/м = Н/м^2$ . Таким образом, в дальнейшем изложении следует различать жесткость баланса и его погонную жесткость, то есть жесткость, отнесенную к единице длины.

При моделировании соударений балансов в процессе их очистки в корообдирочном барабане необходимо, очевидно, принимать во внимание, что с физической точки зрения каждый баланс представляет собой механическую систему, компоненты которой, а именно, кора и остальная часть баланса существенно различаются по жесткости. Жесткость такой системы зависит от жесткости материала отдельных ее компонентов. Различия в жесткости материалов характеризуются модулями упругости, которые определяются экспериментально. Заметим, что механические свойства материала различных компонентов древесного ствола изучены не в равной степени. Наиболее детально исследованы механические свойства древесины как анизотропного материала [1, 9, 17]. Менее детально исследованы механические свойства коры [2, 21]. В еще меньшей степени изучены вопросы, связанные с определением жесткости баланса как системы, образованной совместно деформируемыми корой и остальными частями древесного ствола.

Вместе с тем, для определения силы соударений балансов как друг с другом, так и с корпусом барабана необходимо знать их жесткость. Очевидно, с увеличением жесткости соударяющихся тел сила их контактного взаимодействия возрастает. Поэтому, целенаправленно управляя жесткостью балансов, например, путем изменения их температуры и влажности, можно в определенной степени так влиять на величины сил соударений, чтобы эти силы не были избыточно велики и не приводили к чрезмерному разрушению и потерям древесины в процессе удаления коры. Реализовать эту возможность уменьшения потерь древесины можно, если использовать представленную в статьях [3, 6, 12] математическую модель в качестве инструмента исследования закономерностей изменения сил контактного взаимодействия балансов в зависимости от их жесткости, степени заполнения барабана и других технологических и конструктивных параметров. При выполнении расчетов с использованием данной модели необходимо указывать жесткость балансов в качестве одного из компонентов исходных данных.

В известных нам публикациях, в том числе представленных в Интернет-ресурсах, не удалось найти количественных данных о жесткости балансов, предназначенных для очистки в корообдирочных барабанах. Существующими государственными стандартами

<sup>1</sup> Авторы – соответственно к. т. н., преподаватель кафедры САПР и к. т. н., доцент кафедры механики.  
© Никонова Ю. В., Раковская М. И., 2010

понятие «жесткость баланса при сжатии» не определено. В связи с этим с целью получения количественной оценки жесткости баланса при сжатии была разработана методика ее определения с использованием результатов испытаний натурных образцов, а также методов теории упругости. Методика может быть использована для определения жесткости балансов независимо от породы древесины. Далее рассматривается определение жесткости на примере еловых балансов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЕЛОВЫХ БАЛАНСОВ

В качестве объекта экспериментального исследования выбраны еловые балансы, что объясняется преобладанием древесины этой породы в общем объеме древесины, подвергаемой очистке в корообдирочных барабанах в современных условиях Республики Карелия. Образцы естественной влажности в виде отрезков бревен длиной 1 м были заготовлены в октябре 2008 года на одном из предприятий лесопромышленного комплекса в деревне Шокша Вепской национальной волости Прионежского района Республики Карелия. Испытания проводились в лаборатории кафедры механики Петрозаводского государственного университета 8 октября 2008 года.

Испытания выполнялись на машине Р-10 с приложением нагрузки в радиальном направлении по отношению к годовым кольцам (рис. 2).

Гидравлические машины типа Р-10 предназначены для статических испытаний образцов и элементов конструкций на растяжение и сжатие. Нагрузка на образец передавалась через диски диаметром  $D_1 = 9,5$  см,  $D_2 = 14,5$  см. Такой способ передачи нагрузки достаточно адекватно моделирует тип контакта балансов в корообдирочном барабане между собой и корпусом барабана.

Зависимость сближения точек А и В от величины Р (рис. 1) отображалась на диаграмме, автоматически вычерчиваемой двухкоординатным самописцем, являющемся составным элементом испытательной машины (рис. 2).

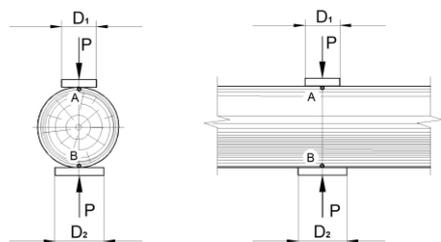


Рис. 1. Схема испытаний

Образцы не доводились до разрушения, испытания проводились в условно упругой стадии, что подтверждалось почти прямо пропорциональной зависимостью сближения точек А и В от силы, отображавшейся на диаграмме при испытаниях в режиме реального времени. Испытания выполнялись с приложением

радиальной поперечной нагрузки в середине образца, а также вблизи его торцов и в других частях с шагом 10 см вдоль продольной оси образца (рис. 2).

В процессе испытаний положение образца изменялось его поворотом на  $90^\circ$  вокруг продольной оси и цикл указанных выше измерений повторялся. Поворот образца на  $90^\circ$  вокруг продольной оси и повторение измерений в таком его положении позволяет учесть различия в жесткости баланса, обусловленные особенностями развития дерева и, как следствие, различиями механических свойств в направлениях «север – юг» и «запад – восток».

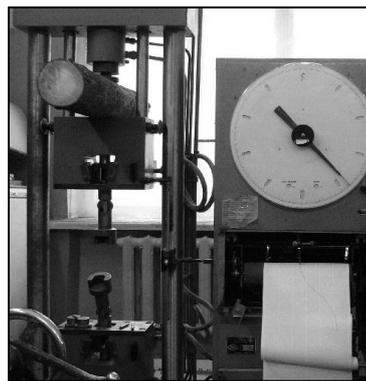


Рис. 2. Общий вид установки для испытаний

Указанный выше шаг 10 см вдоль продольной оси образца (рис. 3) определен с учетом того, что расстояние между мутовками, а значит, и расстояние от одного сучка до другого вдоль продольной оси на поверхности образца в несколько раз больше (по некоторым данным – около полуметра), в этом случае шаг 10 см исключает возможность частого совпадения области приложения нагрузки с областью, занимаемой сучком.

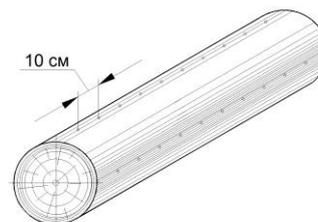


Рис. 3. Области приложения нагрузки к балансу

Приведем в качестве иллюстрации экспериментальные данные, полученные при испытаниях, указанных выше, еловых балансов. Было, в частности, найдено, что сила, вызывающая сближение точек А и В (рис. 1) на 1 мм, равна 1360 Н для баланса диаметром 14,6 см, число годовых колец которого равно 81. Для баланса диаметром 23 см с числом годовых колец 147 значение этой силы возросло до 5000 Н, что, очевидно, является закономерным, поскольку жесткость материала древесного ствола с возрастом увеличивается. В ближайшем изложении сфокусируем внима-

ние на методологических аспектах интерпретации результатов измерений.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для интерпретации результатов измерений, выполненных по представленной выше методике, воспользуемся упрощенной схемой (рис. 4). Заметим, что аналогичные схемы применяются в исследованиях контактного взаимодействия сферических и цилиндрических тел методами теории упругости [9, 15]. Из схемы на рисунке 4 следует, что

$$\Delta_1 = R - \sqrt{R^2 - b_1^2}. \quad (1)$$

Преобразуем выражение (1) к виду:

$$\frac{\Delta_1}{R} = 1 - \sqrt{1 - (b_1/R)^2}. \quad (2)$$

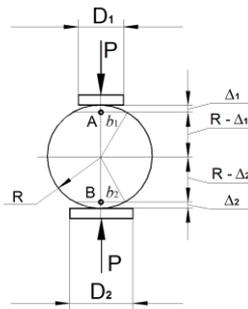


Рис. 4. К интерпретации результатов измерений

Тогда

$$(b_1/R)^2 = 2\Delta_1 R - (\Delta_1 R)^2 \quad (3)$$

или

$$1 - (b_1/R)^2 = (1 - \Delta_1/R)^2. \quad (4)$$

По физическому смыслу рассматриваемой задачи можно считать, что  $\Delta_1 \ll R$ , т. е.  $\Delta_1/R \ll 1$ . Пренебрегая в соотношении (4) величиной второго порядка малости, т. е.  $(\Delta_1/R)^2$  получаем:

$$b_1^2 = 2\Delta_1 R. \quad (5)$$

Аналогично, используя ту же схему (рис. 4), запишем:

$$b_2^2 = 2\Delta_2 R. \quad (6)$$

Величинами  $b_1$  и  $b_2$  приближенно определяется ширина области контакта. Эти величины могут быть найдены также методами теории упругости, что показано, например, в книге [15].

Если воспользоваться упрощенной моделью баланса, рассматривая его как однородный цилиндр из изотропного материала с модулем упругости  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$ , то для случая контакта исходного цилиндра с плоской поверхностью величина  $b_1$  будет равна [16]:

$$b_1 = 1,52 \sqrt{\frac{\bar{P}_1 R}{E}}. \quad (7)$$

Здесь  $\bar{P}_1$  – нагрузка на единицу длины поверхности контакта. В нашем случае (рис. 4) нагрузка на баланс передавалась через жесткие диски диаметром  $D_1$  и  $D_2$ . Принимая во внимание, что  $b_1 \ll D_1$ , определим площадь контакта, как площадь узкого прямоугольника шириной  $2b_1$  и длиной  $D_1$ . Тогда нагрузка на единицу длины контакта

$$\bar{P}_1 = \frac{P}{D_1}. \quad (8)$$

Аналогично:

$$b_2 = 1,52 \sqrt{\frac{\bar{P}_2 R}{E}}, \quad (9)$$

$$\bar{P}_2 = \frac{P}{D_2}. \quad (10)$$

Исключая  $b_1$  из равенств (5) и (7), найдем:

$$\Delta_1 = 1,16 \frac{\bar{P}_1}{E}. \quad (11)$$

Аналогично, подставив (9) в (6), найдем:

$$\Delta_2 = 1,16 \frac{\bar{P}_2}{E}. \quad (12)$$

Полученные нами соотношения (11) и (12) позволяют сделать важный в практическом отношении вывод: при моделировании соударений балансов в корообдирочном барабане влиянием поперечных размеров баланса можно пренебречь, если материал всех балансов имеет один и тот же модуль упругости  $E$ . Однако необходимы уточнения, обусловленные влиянием возраста древесины, а значит и диаметра, на модуль упругости  $E$ .

Иллюстрируя применение формул (11) и (12), приведем результаты вычислений с использованием экспериментальных данных. Было найдено, что сила 1360 Н вызывает сближение точек А и В (рис. 1) на величину  $\Delta = 1$  мм. Это означает, что:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2. \quad (13)$$

Очевидно, величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  прямо пропорциональны величинам  $P_1$  и  $P_2$  соответственно:

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\bar{P}_1}{\bar{P}_2}. \quad (14)$$

Учитывая (8) и (10), запишем:

$$\frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{D_2}{D_1}. \quad (15)$$

Поскольку  $\Delta_2 = \Delta - \Delta_1$ , преобразуем отношение (15):

$$\Delta_1 D_1 = D_2 (\Delta - \Delta_1), \quad (16)$$

$$\Delta_1 D_1 = \frac{D_2}{D_1 + D_2} \Delta. \quad (17)$$

В рассматриваемых случаях  $D_1 = 9,5$  см,  $D_2 = 14,5$  см,  $\Delta = 0,1$  см.

Тогда

$$\Delta_1 = \frac{14,5}{9,5 + 14,5} \cdot 0,1 = 0,0604 \text{ см} \cong 0,6 \text{ мм}, \quad (20)$$

$$\Delta_2 = 0,1 - 0,0604 = 0,0396 \text{ см} \cong 0,4 \text{ мм}. \quad (21)$$

Представим баланс, состоящим из двух полуцилиндров. По определению, погонная жесткость  $S_1$  верхней половины сечения баланса (рис. 1) равна

$$\bar{S}_1 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_1}. \quad (22)$$

Учитывая жесткость той же части  $S_1 = P_1/\Delta_1$ , получим:

$$\bar{S}_1 = \frac{P}{D_1 \Delta_1} = \frac{136}{0,0604 \cdot 9,5} = 2370 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}. \quad (23)$$

Аналогично:

$$\bar{S}_2 = \frac{P}{D_2 \Delta_2} = \frac{136}{0,0396 \cdot 14,5} = 2370 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}. \quad (24)$$

Величины (19) и (20) получены для баланса диаметром 14,5 см. Испытания баланса диаметром 23 см по техническим условиям были выполнены на другой установке. Нагрузка на баланс передавалась через две одинаковые плиты длиной 28 см каждая. При этом было установлено, что сила 5000 Н вызывает сближение точек А и В на 1 мм. Это означает, что  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,5$  мм:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \frac{500}{0,05 \cdot 28} = 3570 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}. \quad (25)$$

Обратим внимание на то обстоятельство, что указанный в формулах (11) и (12) модуль упругости  $E$  предполагается одним и тем же для всех частиц материала баланса. Очевидно, применение модели баланса в виде однородного цилиндра из изотропного материала оправдано, если используется приведенный или усредненный модуль упругости, то есть если учтено существенное различие жесткости материала коры и основной части древесного ствола при сжатии в радиальном направлении.

Как известно, модуль упругости древесины при сжатии в радиальном направлении примерно в 20 раз меньше модуля упругости при сжатии вдоль волокон [8].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ БАЛАНСА

Погонная жесткость, приходящаяся на единицу длины, определяется отношением силы к соответствующему этой силе перемещению, что в рассматриваемой задаче определяется соотношением:

$$\bar{S}_1 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_1}; \quad \bar{S}_2 = \frac{\bar{P}_2}{\Delta_2}. \quad (26)$$

Подставив (11) и (12) в (22), получим:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0,86 E. \quad (27)$$

Здесь  $E$  – приведенный (или усредненный) модуль упругости, который может быть вычислен по известной формуле:

$$E = \frac{E_0 E_r}{E_0 + E_r}. \quad (28)$$

Здесь  $E_0$  и  $E_r$  – модуль упругости соответственно коры и древесины при сжатии в радиальном направлении. Методика измерения и характеристики жесткости коры исследованы А. С. Васильевым [2]. С учетом известных по литературе данных [2, 8] можно приближенно считать, что для еловых балансов

$$E_r = 0,67 \text{ ГПа} (67000 \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}), E_0 \cong E_r/20. \quad (29)$$

$$\text{Тогда } E = \frac{E_r \cdot E_r}{20(E_r/20 + E_r)} = \frac{E_r}{21}. \quad (30)$$

Подставив (25) в (23), получим:

$$S_1 = S_2 = 0,86 \cdot E_r/21 = 0,041 E_r. \quad (31)$$

Если, например,  $E_r = (67000 \pm 1340) \frac{\text{Н}}{\text{см}^2}$ , то по

формуле (26) вычисляем нижнюю оценку погонной жесткости баланса:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0,041 \cdot 53600 = 2200 \frac{\text{Н/см}}{\text{см}}. \quad (32)$$

Верхняя оценка равна:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0,041 \cdot 80400 = 3300 \frac{\text{Н/см}}{\text{см}}. \quad (33)$$

Для перехода от погонной жесткости и обычно используемой в расчетах необходимо величину  $S_1$  (28) или (27) умножить на длину пятна контакта.

Принимая во внимание вариабельность механических свойств свежезаготовленной древесины, можно сделать вывод о том, что полученные с применением методов теории упругости оценки (27) и (28) достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента (19), (20), (21).

С другой стороны, вариабельность механических свойств, анизотропия и неоднородность материала свежесрубленной древесины затрудняют или делают невозможным учет в математической модели всего комплекса свойств реального объекта исследования с применением аналитических методов теории упругости [9, 15]. По этой причине используются упрощенные модели и соответственно упрощенные аналитические методы, а также численные методы.

Одна из методик определения жесткости (27), (28) рассмотрена выше. Поскольку эта методика является упрощенной, представляется методологически целесообразным применение и других методик для получения оценки жесткости. Тогда сравнение результатов, полученных по различным методикам, позволит сделать вывод о достоверности результатов исследо-

вания. В этой связи рассмотрим применение метода конечных элементов для определения жесткости балансов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ

Вспользуемся в качестве инструмента исследования программой конечно-элементного анализа «Лири-9». С точки зрения механики рассматриваемая проблема формулируется как плоская задача теории упругости, для решения которой применяется метод конечных элементов. Баланс упрощенно рассматриваем как однородное изотропное тело, модуль упругости материала  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

В целях определения закономерностей влияния модуля упругости материала и диаметра баланса на его жесткость была выполнена серия расчетов, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Результаты, полученные по программе «Лири-9»

Модуль упругости материала (Н/см <sup>2</sup> )	Диаметр баланса (см)			
	15	20	25	30
2500	576	576	576	576
50000	1152	1152	1152	1152
75000	1728	1728	1728	1728
100000	2304	2304	2304	2304

В таблице 1 приведены значения силы, вызывающей сближение точек  $A$  и  $B$  на 1 см для условного баланса при  $D_1 = D_2$  (рис. 1). Расчеты выполнены с использованием модели, в которой число конечных элементов равно 4455, число узлов – 2323, число уравнений метода конечных элементов – 4628.

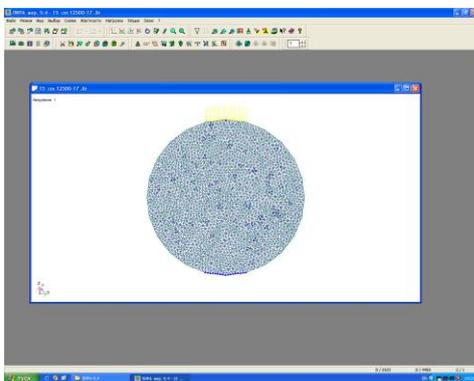


Рис. 5. Сетка конечных элементов

Для выполнения одного расчета на компьютере с оперативной памятью 1 ГБ и частотой центрального процессора 2,7 МГц было затрачено 15 секунд. Фрагмент копии экрана показан на рисунке 5.

Полученные результаты численного моделирования (табл. 1) полностью подтверждают правомерность обоснованного выше вывода о том, что диаметр баланса не влияет на величину его деформации в рассматриваемой задаче.

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_1} = \frac{1152}{0,5} = 2304 \frac{H}{cm^2}. \quad (34)$$

Результаты численного моделирования (табл. 1) показывают, что округленные до целых значения силы, вызывающей сближение точек  $A$  и  $B$  на 1 см, не зависят от диаметра цилиндра. Эти данные позволяют записать следующую эмпирическую зависимость:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_2 = 0,046 E. \quad (35)$$

Зависимость (29) аналогична ранее полученной зависимости (26), что подтверждает достоверность результатов исследования. Расхождение коэффициентов в (26) и (29) составляет:

$$\varepsilon = \frac{0,046 - 0,041}{0,041} \cdot 100\% = 12\% \quad (36)$$

Используя результаты конечно-элементного моделирования (табл. 1), вычислим нижнюю и верхнюю оценки жесткости баланса с указанным выше модулем упругости  $E = E_r = (53600..80400) H/cm^2$ . По формуле (29) вычисляем верхнюю оценку:

$$S_1 = S_2 = 0,046 \cdot 80400 = 3700 \frac{H/cm}{cm}. \quad (37)$$

По той же формуле определяем нижнюю оценку:

$$S_1 = S_2 = 0,046 \cdot 53600 = 2470 \frac{H/cm}{cm}. \quad (38)$$

### ВЫВОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРИВЕДЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ БАЛАНСА

Как уже отмечено выше, жесткость древесины как материала исследовалась многими авторами [1, 8, 9, 17]. Жесткость коры, как отдельно взятого элемента, исследовалась А. С. Васильевым [2]. В данной работе исследуется жесткость системы, образованной основной частью древесины и корой.

Перемещение  $\Delta_1$  (рис. 4) представим в виде суммы:

$$\Delta_1 = \Delta_0 + \Delta_w, \quad (39)$$

где величина  $\Delta_0$  обусловлена деформированием коры, а величина  $\Delta_w$  определяет свойства древесины.

Как указано выше, жесткость

$$S_1 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_1}. \quad (40)$$

Аналогично

$$S_0 = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_0}; S_w = \frac{\bar{P}_1}{\Delta_w}. \quad (41)$$

Тогда

$$A_0 = \frac{\bar{P}_l}{S_0}; A_w = \frac{\bar{P}_l}{S_w}. \quad (42)$$

С учетом (33) получаем:

$$S_l = \frac{\bar{P}_l}{\Delta_l} = \frac{\bar{P}_l}{\frac{\bar{P}_l}{S_0} + \frac{\bar{P}_l}{S_w}} = \frac{I}{\frac{S_0 + S_w}{S_0 \cdot S_w}} = \frac{S_0 S_w}{S_0 + S_w}. \quad (43)$$

Таким образом,

$$S_l = \frac{S_0 S_w}{S_0 + S_w}. \quad (44)$$

Принимая во внимание, что согласно равенству (23) указанные в формуле (38) жесткости прямо пропорциональны соответствующим модулям упругости, приходим к равенству (24).

## ВЫВОДЫ

Воспользуемся упрощенной моделью баланса. Термин «упрощенная модель» означает, что в качестве модели баланса (который является анизотропным телом) было принято тело из изотропного материала. Расчет тела из изотропного материала выполняется методами теории упругости с использованием известных результатов, достаточно полно представленных в книге [15].

Анализ результатов выполненной части исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана методика определения жесткости балансов с корой, при сжатии в радиальном направлении. Результаты экспериментального и численного определения жесткости балансов согласуются с данными, полученными по формулам теории упругости.

2. Влияние величины только диаметра баланса на его жесткость пренебрежимо мало. Однако диаметр баланса зависит от возраста древесины, а с возрастом изменяется жесткость коры и основной части древесного ствола. Поэтому жесткость баланса оказывается зависящей от возраста, а значит и от диаметра. Установлено, что жесткость баланса прямо пропорциональна модулю упругости, но не равна ему (23).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. М.: Лесная пром-сть, 1978. 224 с.
2. Васильев А. С. Обоснование технических решений, повышающих эффективность режимов групповой окорки древесного сырья: Дис. канд. техн. наук: 05.21.01 / А. С. Васильев. Петрозаводск, 2004. 148 с.
3. Васильев А. С. Моделирование процесса групповой окорки древесного сырья / А. С. Васильев, Ю. В. Никонова // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. Вологда: ВоГТУ, 2008. С. 113–114.

4. Васильев С. Б. Формирование технологических процессов и обоснование параметров оборудования для производства технологической щепы / С. Б. Васильев, И. Р. Шегельман. Петрозаводск, 2000. 52 с.
5. Васильев А. С. Математическое моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане / А. С. Васильев, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Ученые записки Петрозаводского государственного университета: Серия. Естественные и технические науки. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. № 1. С. 117–119.
6. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Ученые записки Петрозаводского государственного университета: Серия. Естественные и технические науки. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. № 4. С. 81–88.
7. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 185. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2008. С. 258–264.
8. Лесная энциклопедия: В 2 т. Т. 2 / Гл. ред. Г. И. Воробьев; ред. кол.: Н. А. Анучин, В. Г. Атрохин, В. Н. Виноградов и др. М.: Сов. Энциклопедия, 1986. 631 с.
9. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1977. 415 с.
10. Никонова Ю. В. Некоторые закономерности распределения сил контактного взаимодействия балансов и корпуса корообдирочного барабана как результат численного моделирования / Ю. В. Никонова // Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике: Материалы VII международной научно-технической конференции. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. С. 49–50.
11. Никонова Ю. В. О численном моделировании технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане / Ю. В. Никонова // Современные проблемы информатизации в проектировании информационных систем: Сб. трудов. Вып. 13 / Под ред. д. т. н., проф. О. Я. Кравца. Воронеж: Научная книга, 2008. С. 423–426.
12. Раковская М. И. Численное моделирование и определение сил контактного взаимодействия длинномерных сортиментов в корообдирочном барабане / М. И. Раковская, Ю. В. Никонова // Системы управления и информационные технологии. № 1.3 (31). Воронеж: Научная книга, 2008. С. 397–401.
13. Раковская М. И. Об алгоритме метода дискретных элементов применительно к исследованию технологического процесса очистки древесины в окорочном барабане / М. И. Раковская, Ю. В. Нико-

- нова, А. С. Васильев // Информационные технологии моделирования и управления. Воронеж: Научная книга, 2008. № 1(44). С. 119–124.
14. Раковская М. И. О численном моделировании полукоэрцитивного контактного взаимодействия в механических системах с применением методов конечных и дискретных элементов / М. И. Раковская, Ю. В. Никонова, С. В. Гринь // Обозрение прикладной и промышленной математики. М., 2008. Т. 15. Вып. 2. С. 354–355.
  15. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Г. С. Шапиро. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.
  16. Тимошенко С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. М.: Мир, 1976. 670 с.
  17. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины / С. В. Тутурин. М.: Изд-во Спутник+, 2007. 311 с.
  18. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела / А. П. Филин. М.: Наука, 1978. 616 с.
  19. Шегельман И. Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: Словарь / И. Р. Шегельман. 4-е изд., перераб. и доп. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 278 с.
  20. Шегельман И. Р. Моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане с применением метода дискретных элементов / И. Р. Шегельман, А. С. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 184. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2008. С. 258–264.
  21. Baroth R. Literature review of latest development of wood debarking / R. Baroth // University of Oulu, Control Engineering Laboratory. 2005. № 27. 29 p.