

УДК 536.24

## О ВОЗНИКНОВЕНИИ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ВЛИЯНИИ НА РЕЖИМЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ

А. М. Гришин, А. Н. Голованов, В. В. Медведев\*

Томский государственный университет, 634050 Томск

\* Томский политехнический университет, 634004 Томск

С использованием оптоэлектронной техники экспериментально исследованы колебания элементов лесных горючих материалов в ламинарном потоке воздуха. Определены модуль Юнга и жесткость, значения которых удовлетворительно согласуются с известными данными. Показано, что взаимодействие элементов лесных горючих материалов с потоком воздуха приводит к несимметричному отрыву потока, что вызывает колебания хвоинок и веточек с частотой, равной частоте их собственных колебаний. Из анализа экспериментальных данных получена оценка предельных значений равновесной скорости ветра в пологе леса, при которых может возникать и затухать лесной пожар.

Как известно, горение лесных горючих материалов (ЛГМ) при лесных пожарах происходит в диффузионном режиме [1], поэтому представляет интерес изучение механизма колебаний и влияния колебаний элементов ЛГМ (тонких веточек и хвоинок) на коэффициенты тепло- и массообмена.

В работах [1, 2] выдвинута гипотеза о механизме колебаний элементов ЛГМ и их влиянии на механизм горения лесных горючих материалов, согласно которой колебания этих элементов в пологе леса обусловлены несимметричным отрывом газового потока от поверхности элемента ЛГМ, в результате чего изменяется режим горения и может возникать верховой лесной пожар. В данной работе экспериментально подтверждается эта гипотеза, предложена приближенная методика определения собственных частот колебаний ЛГМ и исследовано влияние тепло- и массообмена на режимы воспламенения и горения ЛГМ.

**1. Цель и методика эксперимента.** Целью данной работы является экспериментальное исследование механизма колебаний типичных элементов ЛГМ в потоке газа, определение собственных частот колебаний и упругих свойств ЛГМ, анализ влияния этих колебаний на режимы воспламенения и горения ЛГМ, а также уточнение критической скорости ветра, при которой может возникнуть верховой лесной пожар.

С точки зрения механики любое дерево представляет собой сложную конструкцию, включающую следующие упругие элементы: ствол; крупные ветки; тонкие веточки, расположенные на ветвях; хвоинки, расположенные на тонких веточках. Каждый элемент этой конструкции имеет собственную частоту колебаний. Поскольку 70 % элементов ЛГМ составляют хвоинки и тонкие веточки, исследовались колебания этих упругих тел. Физической моделью объектов являлась консоль — балка, один конец которой закреплен, а другой свободен. Следует отметить, что реальная хвоинка искривлена, однако максимальная степень искривления хвоинки  $\Delta x_{\max}$  мала по сравнению с ее длиной  $l_s$ , поэтому хвоинку можно считать прямым цилиндром с эффективным диаметром  $d_s = 2\sqrt{s/\pi}$ , где  $s$  — площадь среднего поперечного (миделева) сечения. Веточки представляют собой прямые круглые цилиндры. Кроме того, рассматривалось обтекание веточки с совокупностью хвоинок. На рис. 1 представлены схемы экспериментов. Следует отметить, что поперечные сечения веточек представляют собой круг, а поперечное сечение хвоинки сосны имеет сложную серповидную форму [1].

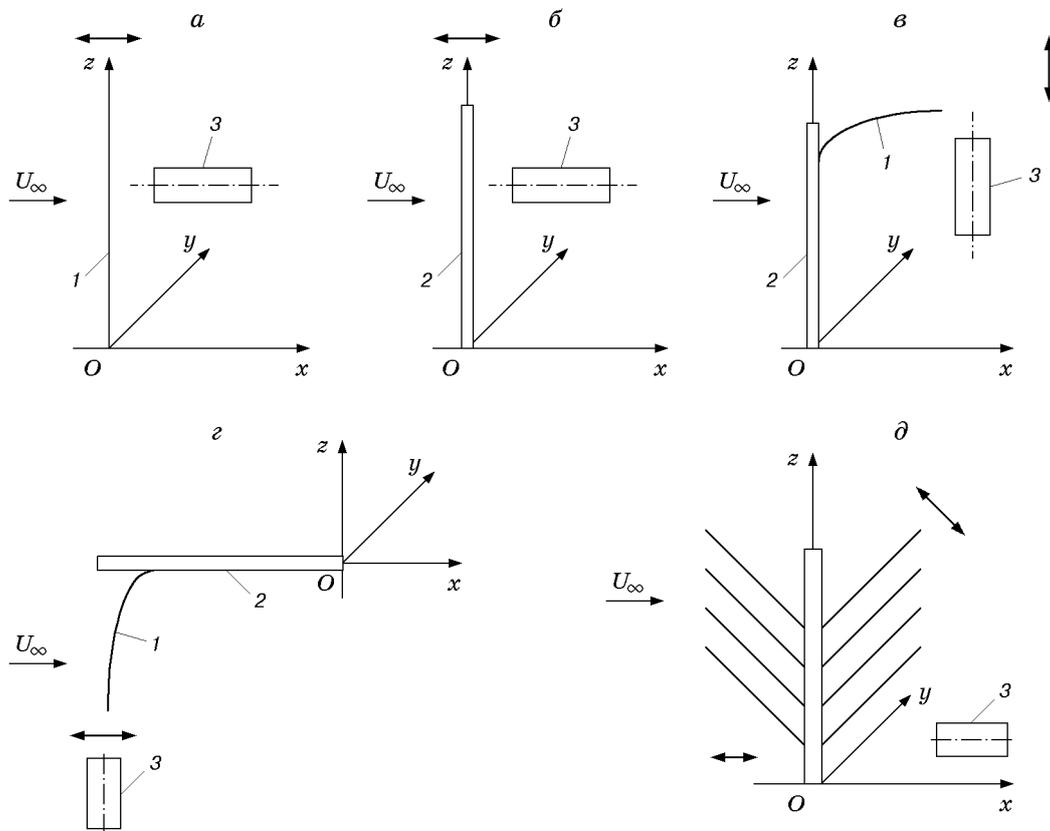


Рис. 1. Схема расположения элементов ЛГМ:

1 — хвоинка, 2 — веточка, 3 — оптоэлектронный датчик; а — обтекание отдельной хвоинки, б — обтекание тонкой веточки, в, г — продольное и поперечное обтекание консолей веточка — хвоинка, д — обтекание охвоенной веточки

На рис. 2 представлена фотография среза хвоинки при 20-кратном увеличении. Влагосодержание хвоинки  $W = (m - m_0)/m_0 = 67,8\%$ , где  $m$  и  $m_0$  — массы влажной и высушенной при  $T = 100$  °С хвоинок. Элементы ЛГМ помещались в рабочий участок дозвуковой аэродинамической трубы МТ-324 Томского государственного университета. На рис. 1 стрелками показаны направления скорости ламинарного потока воздуха  $u_\infty$ . Скорость потока измерялась насадком Пито — Прандтля, а также термоанемометром [3] и варьировалась в пределах  $u_\infty = 1,0 \div 3,6$  м/с. Поток воздуха возбуждал в хвоинках 1 и веточках 2 (см. рис. 1) периодические колебания в плоскостях  $xz$  и  $yz$  (жирными стрелками

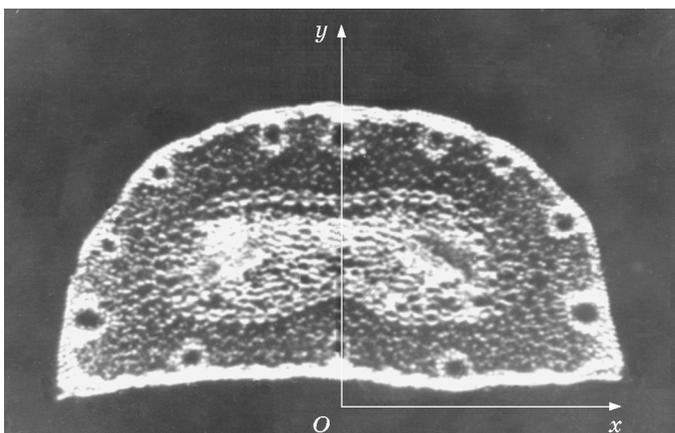


Рис. 2. Фотография среза хвоинки и расположение осей координат, выбранных для определения момента инерции

Таблица 1

Элемент ЛГМ	$l_s$ , мм	$d_s$ , мм	$W$ , %	$f$ , Гц
Хвоинка сосны	26	0,7	11,2	20,0
Хвоинка сосны	41	0,9	19,1	21,4
Хвоинка сосны	43	1,0	54,2	16,7
Хвоинка кедра	80	1,0	12,1	38,5
Хвоинка ели	16	0,7	12,7	4,4
Хвоинка сосны	60	4,0	—	21,0

показаны смещения  $x$  относительно положения равновесия). Ось  $z$  направлена вертикально вверх от закрепленного конца консоли. Величина смещения и частота колебаний хвоинок  $f$  определялись с помощью оптоволоконного датчика 3, который регистрировал колебания в плоскостях  $xz$  и  $yz$ . Оптоволоконный датчик состоял из двух кварц-полимерных световодов диаметром 0,3 мм, свободные концы которых были совмещены и находились на расстоянии  $h$  от диффузно отражающей свет хвоинки. Свет от лампы накаливания МН 6,3-0,3 поступал на торец одного световода и передавался на поверхность хвоинки. Отраженный световой пучок поступал через другой световод в окно фотоприемника ФЭУ-118, где преобразовывался в электрический сигнал, регистрируемый на осциллографе как функция времени  $t$  и расстояния  $h$ . Величина  $h$  перед каждой серией опытов калибровалась с помощью микрометрического столика.

Время разрешения датчика  $\tau = R_n C_\Phi = 10^{-6}$  с ( $R_n = 100$  кОм — сопротивление нагрузки;  $C_\Phi = 10^{-10}$  Ф — междинодная емкость фотоприемника ФЭУ-118). Пространственное разрешение датчика 1 мВ/мкм.

Эксперименты проводились с типичными элементами ЛГМ (веточками и хвоинками). Масса тонких веточек в выборке  $m = 0,25 \div 0,30$  г, хвоинок —  $m = 0,012 \div 0,020$  г; длина хвоинок  $l_s = 45 \div 55$  мм, веточек —  $l_s = 40 \div 70$  мм; диаметр веточек 3,5  $\div$  7,0 мм, эквивалентный диаметр хвоинок 0,95  $\div$  1,09 мм.

**2. Результаты исследований собственных колебаний одиночной хвоинки и оголенной тонкой веточки в неподвижном газе и ламинарном потоке воздуха.** На первом этапе исследования сравнивались собственные частоты колебаний отдельных хвоинок и веточек (см. рис. 1, *a, б*) в результате воздействия одиночного возмущения с амплитудой  $A_0 = 2$  мм (табл. 1) и непрерывного возмущения с амплитудой  $A$ , вызванного действием потока воздуха в аэродинамической трубе (табл. 2). Здесь  $Re$  — число Рейнольдса;  $Sh = f d_s / u_\infty$  — число Струхала.

Таблица 2

$u_\infty$ , м/с	Хвоинка сосны*				Веточка сосны**			
	$f$ , Гц	$A$ , мм	$Re$	$Sh$ , $10^{-3}$	$f$ , Гц	$A$ , мм	$Re$	$Sh$ , $10^{-3}$
1,1	20–26	1,15	68,3	18,0	2,1	0,10	100,5	7,6
1,6	18–22	1,56	99,3	12,4	2,0	0,12	436,9	5,0
1,9	18–22	1,74	117,3	10,4	2,1	0,13	518,8	4,4
2,5	20–25	1,91	155,3	7,9	2,0	0,14	682,9	3,2
3,1	20–26	2,07	192,3	6,4	2,1	0,16	846,6	2,7
3,6	20–25	2,20	223,3	5,5	2,1	0,17	983,0	2,3

\*  $l_s = 41$  мм,  $d_s = 0,9$  мм,  $W = 19,9\%$ .\*\*  $l_s = 60$  мм,  $d_s = 4$  мм.

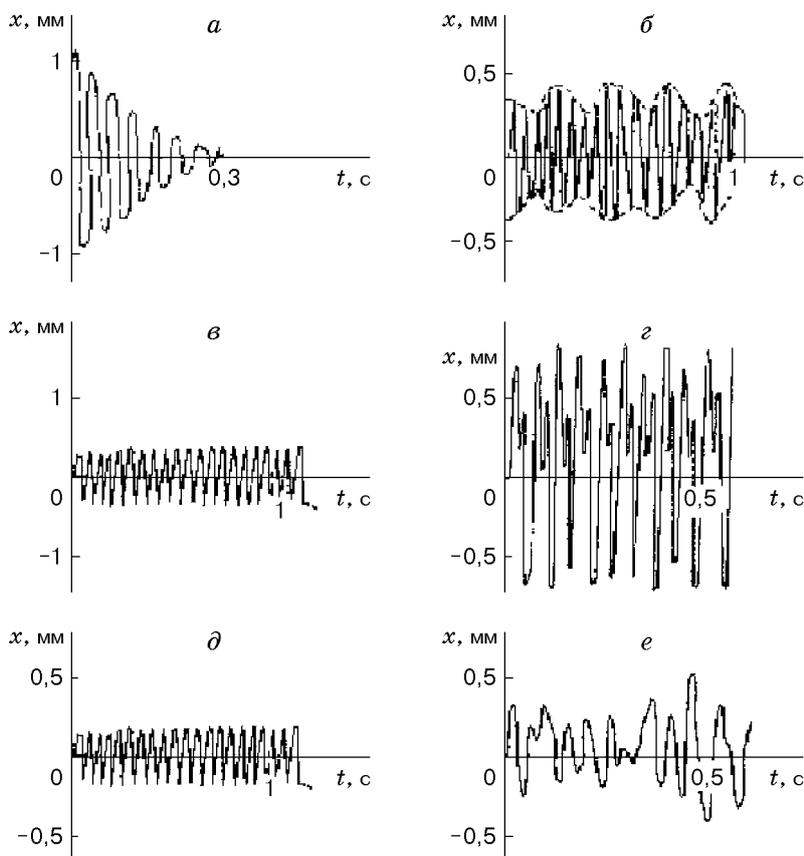


Рис. 3. Осциллограммы колебаний ЛГМ при воздействии одиночного возмущения (*a*) и в потоке воздуха (*б–e*):

*a* — схема на рис. 1, *a*; *б* — схема на рис. 1, *б* (вдоль оси *Ox*); *в* — схема на рис. 1, *б* (вдоль оси *Oy*); *г* — схема на рис. 1, *в*; *д* — схема на рис. 1, *г*; *е* — схема на рис. 1, *д*

На рис. 3, *a, б* представлены осциллограммы амплитуды колебаний как функции времени при воздействии одиночного возмущения (затухающие колебания) и в потоке воздуха (незатухающие, близкие к гармоническим колебания).

Изменение начальной амплитуды колебаний  $A_0 = 0,5 \div 4,5$  мм в результате воздействия начальной возмущающей силы не приводило к изменению частоты собственных колебаний элементов ЛГМ. Следует отметить, что частота собственных колебаний хвоинок сосны слабо зависит от влагосодержания (см. табл. 1). Для хвоинки сосны  $f = 21,4$  Гц при  $W = 19,1\%$ ,  $f = 16,7$  Гц при  $W = 54,2\%$ . Частоты колебаний хвоинок сосны в потоке воздуха для рассмотренного диапазона частот не зависят от скорости ветра и совпадают с частотами колебаний в неподвижном воздухе (см. табл. 2).

**3. Закономерности обтекания хвоинок и тонких веточек.** Как известно, при обтекании труб в теплообменниках может возникать эффект аэродинамических вибраций труб, обусловленный несимметричным отрывом потока [4, 5]. При этом часть энергии потока расходуется на поддержание вибраций трубы с частотой, близкой к собственной частоте упругих колебаний. При ламинарном характере обтекания цилиндра при числе Рейнольдса  $Re = \rho u_\infty d / \mu > 60$  возникает вихревая дорожка, называемая вихревой дорожкой Кармана [5]. Вихревые дорожки могут генерировать акустический шум и являться источником колебаний ЛГМ [1]. В экспериментах число Рейнольдса воздушного потока варьировалось в пределах  $50 \leq Re \leq 400$ . Расчеты возможных частот отрыва вихрей по формуле  $f_n = Sh_* u_\infty / d_s$  ( $Sh_* = 0,2$  [1, 4]) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Элемент ЛГМ	Re	$f_n$ , Гц	
		Рис. 1,в	Рис. 1,г
Веточка	259	6286	—
	375	9143	—
	445	10 858	—
Хвоинка	74	—	32 000

На рис. 4 представлена фотография течения газа за хвоинкой (светлая вертикальная полоса в правой части фотографии) по схеме, приведенной на рис. 1,а. Капля масла, нанесенная на нагретую электрическим током проволочку, давала шлейф дыма, который обтекал хвоинку. На фотографии видны шлейфы от четырех капель. Колебания привели к появлению периодически изменяющихся темных и светлых пятен в шлейфах. Частота появления светлых пятен на фотографиях  $f \approx 20$  Гц совпадает с частотой колебаний хвоинок. Несимметричное чередование светлых пятен на фотографии свидетельствует о наличии несимметричного отрыва потока газа при обтекании элементов ЛГМ.

Хвоинки и веточки колебались не только в плоскости  $xz$  (см. рис. 2), но и в плоскости  $zy$ . При этом частота колебаний в плоскости  $zy$  совпадала с частотой колебаний в плоскости  $xz$ , а амплитуда в исследуемом диапазоне скоростей составляла  $0,17 \div 0,30$  значений амплитуды колебаний в плоскости  $xz$ . Этот результат свидетельствует о том, что причиной возникновения колебаний хвоинок и тонких веточек является несимметричный отрыв ламинарного потока [1, 4].

На рис. 3,е показана зависимость координаты хвоинки  $x$  от времени при обтекании потоком воздуха охвоенной веточки по схеме, представленной на рис. 1,д ( $u_\infty = 1,1$  м/с). Видно, что колебания представляют собой суперпозицию колебаний хвоинки и веточки.

**4. Определение упругих свойств элементов ЛГМ.** Информацию о частотах собственных колебаний элементов ЛГМ можно использовать для определения упругих свойств, таких как эффективный модуль Юнга  $E$  и жесткость  $EI$  ( $I$  — момент инерции). Для расчетов  $E$  и  $EI$  использовались формулы из [1, 6, 7] для определения минимальной

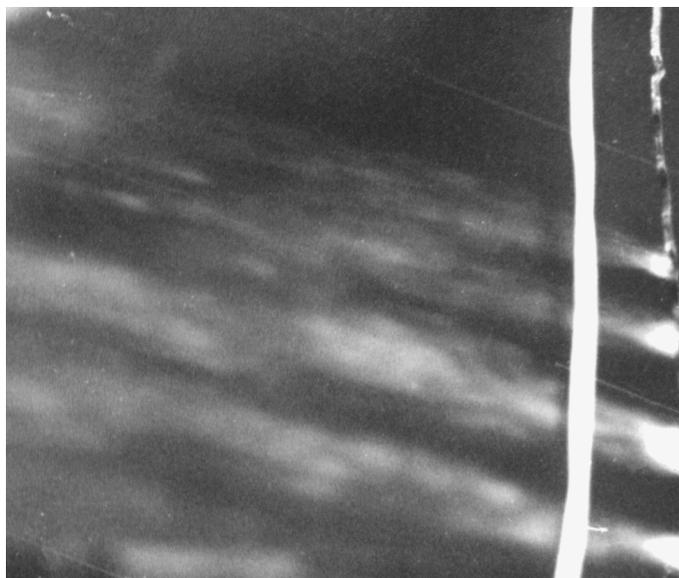


Рис. 4. Фотография шлейфов дыма за хвоинкой от нагретых капель масла

Таблица 4

Элемент ЛГМ	$f$ , Гц	$m$ , г	$l_s$ , мм	$d_s$ , мм	$W$ , %	$E_{eff}$ , Н/м <sup>2</sup>	$EI$ , Н·м <sup>2</sup>
Хвоинка ели	4,4	2,1	16	0,7	11,3	$(0,94 \pm 0,03) \cdot 10^7$	$2,24 \cdot 10^{-7}$
Хвоинка кедра	38,5	4,8	80	1,0	10,8	$(0,78 \pm 0,05) \cdot 10^9$	$7,65 \cdot 10^{-5}$
Хвоинка сосны	21,4	2,9	41	0,9	16,2	$(3,24 \pm 0,07) \cdot 10^{10}$	$4,11 \cdot 10^{-4}$
Хвоинка сосны	16,7	4,6	43	1,0	34,9	$(1,79 \pm 0,06) \cdot 10^{10}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$
Хвоинка сосны	20,0	5,4	43	0,9	67,8	$(0,85 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$
Веточка сосны	2,1	3,6	60	4,0	—	$(0,89 \pm 0,02) \cdot 10^{10}$ $(0,9 \cdot 10^{10})^*$	0,22

\* Значение  $E$  для цилиндров из древесины [8].

частоты собственных колебаний консоли цилиндрической формы:

$$f_s = \frac{3,52}{l_s^2} \sqrt{\frac{EI}{m_l}}, \quad m_l = \frac{m}{l_s}, \quad I = \frac{\pi d^4}{32}. \quad (1)$$

В расчетах момент инерции реальной хвоинки заменялся моментом инерции эффективного цилиндра, радиус которого  $r_{eff} = \sqrt{s/\pi}$  (см. рис. 1). Кроме того, момент инерции рассчитывался численно по формуле [7]

$$I = \iiint_v (x^2 + y^2) \rho_s dv, \quad (2)$$

где  $\rho_s$  — плотность хвоинки или тонкой веточки;  $v$  — объем хвоинки или веточки.

Площади миделевых сечений  $s$  ЛГМ определялись как функции их высоты  $h$  по результатам фотосъемки срезов хвои при их 20-кратном увеличении (см. рис. 2).

Для оценки точности полученных результатов проводились тестовые измерения и расчеты значений  $f$  для цилиндров из сосны и стали. Так, для цилиндра из сосны ( $l_s = 72$  мм,  $d_s = 5$  мм, плотность  $\rho_s = 0,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, частота собственных колебаний, рассчитанная по формуле (1),  $f_p = 861$  Гц, измеренная частота  $f = 667$  Гц. Для цилиндра из стали ( $l = 53$  мм,  $d = 1$  мм,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>)  $f_p = 365$  Гц,  $f = 312$  Гц. Значения  $E$  взяты из работы [8]. Видно, что результаты удовлетворительно согласуются с расчетом.

В табл. 4 приведены значения упругих характеристик типичных элементов ЛГМ. Сравнение полученных результатов с известными данными подтверждает обоснованность предложенной методики определения упругих свойств ЛГМ. Доверительные интервалы  $\Delta E$  рассчитывались по результатам 4–5 опытов при доверительной вероятности 0,95.

**5. Результаты исследований колебаний системы веточка — хвоинка.** На рис. 3,з,д показаны типичные осциллограммы поперечного смещения хвоинки. Рис. 3,з (см. схему на рис. 1,в) и рис. 3,д (см. схему на рис. 1,г) соответствует  $u_\infty = 1,1$  м/с.

Таблица 5

$u_\infty, \text{ м/с}$	Рис. 1,в			Рис. 1,з		
	$A, \text{ мм}$	$f_1, \text{ Гц}$	$f_2, \text{ Гц}$	$A, \text{ мм}$	$f_1, \text{ Гц}$	$f_3, \text{ Гц}$
1,1	1,15	20–26	—	1,30	20–25	5–6
1,6	1,56	18–22	40–46	—	—	—
1,9	1,74	18–22	40–42	—	—	—
2,5	1,91	20–25	39–41	—	—	—
3,1	2,07	20–26	40–41	1,41	19–25	5–6
3,6	2,20	20–25	40–45	1,50	20–26	5–5

Примечание. В экспериментах, проведенных по схеме, представленной на рис. 1,в, отсутствует частота  $f_3$ , на рис. 1,з — частота  $f_2$ .

В табл. 5 приведены характерные значения частот колебаний и амплитуд для различных условий экспериментов. В табл. 6 приведены значения частот и амплитуд колебаний для условий экспериментов, проведенных по схеме, представленной на рис. 1,д (см. также рис. 3,д).

Анализ результатов, представленных на рис. 3 и в табл. 4, 5, показывает, что в спектрах колебаний системы веточка — хвоинка присутствует не более трех доминирующих частот:  $f_1 = 18 \div 25 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 40 \div 46 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 5 \div 6 \text{ Гц}$ . С увеличением скорости воздушного потока амплитуда колебаний монотонно возрастает, частота практически не меняется. Слабая зависимость частоты собственных колебаний элементов ЛГМ от скорости воздушного потока обусловлена тем, что частота этих колебаний является функцией геометрических размеров, массы, упругих свойств веточек и хвоинок [1, 7].

При скорости воздушного потока  $u_\infty \approx 1,5 \text{ м/с}$  на колебания хвоинки накладываются колебания веточки (см. рис. 1,з) с частотой  $f_2 \approx 2f_1$ . Следует отметить, что смещение конца хвоинки вдоль оси  $x$ , вызванное колебаниями веточки, всегда положительно. Анализ экспериментальных данных позволяет утверждать, что это объясняется деформацией элементов ЛГМ, вызванной действием скоростного напора потока воздуха. Измеренная частота колебаний основания хвоинки (конца веточки)  $f = 36 \div 42 \text{ Гц}$  близка к значениям  $f_2$ , что подтверждает механизм колебаний с частотой  $f_2$ .

При обтекании системы веточка — хвоинка по схеме, представленной на рис. 1,в, происходит модуляция поперечных колебаний хвоинки (см. рис. 4,з) при скорости пото-

Таблица 6

$u_\infty, \text{ м/с}$	Система веточка — хвоинка			
	$A', \text{ мм}$	$f', \text{ Гц}$	$A'', \text{ мм}$	$f'', \text{ Гц}$
1,1	0,40	2,0	0,75	60–70
1,6	0,45	2,0	0,89	62–70
1,9	0,46	2,1	0,99	58–67
2,5	0,52	2,1	1,39	60–70
3,1	0,58	2,1	1,52	65–70
3,6	0,62	1,9	1,70	60–70

Примечание. Индекс “'” соответствует веточке, “''” — хвоинке.

ка воздуха  $u_\infty \geq 1,1$  м/с. Частота модулирующих колебаний  $f_3 = 5 \div 6$  Гц, так же как частота колебаний хвоинок, практически не зависит от скорости воздуха. Причиной модуляции является суперпозиция поперечных колебаний хвоинки и продольных колебаний веточки (см. рис. 1,б). Измерения частоты колебаний основания хвоинки (конца веточки) подтвердили это ( $f = 5 \div 8$  Гц).

Система веточка — хвоинка чувствительна к воздействию акустических колебаний, генерируемых динамиком и генератором звуковых колебаний [3]. Интенсивность звука составляла 60 дБ, частота гармонических колебаний варьировалась в пределах  $10 \div 100$  кГц. Колебания веточек и хвоинок оказались невосприимчивыми к акустическим колебаниям частот  $f = 10 \div 100$  Гц, а при частотах  $1 \div 50$  кГц происходило “размывание” модулирующей частоты вплоть до полного исчезновения (см. рис. 3,в). Такие частоты ультразвуковых колебаний близки к собственным частотам продольных колебаний элементов ЛГМ. Исчезновение колебаний с модулирующей частотой  $f = 5 \div 6$  Гц, вероятно, связано с изменением упругих свойств элементов ЛГМ, вызванных резонансными явлениями в них.

**6. Влияние колебаний системы веточка — хвоинки на процесс горения.** Резонансные явления оказывают воздействие на горение системы веточка — хвоинки при продольных в направлении  $Ox$  (см. рис. 1,д) колебаниях основания веточки. При проведении опытов частота колебаний  $f$  варьировалась в пределах  $0 \leq f \leq 6,2$  Гц, амплитуда  $\delta x = 0 \div 14$  мм. Охвоенная веточка поджигалась, и в зависимости от интенсивности колебаний наблюдалось ее разгорание или потухание. В ходе экспериментов регистрировалась плотность теплового потока  $q$  в зоне горения экспоненциальным методом [1, 3] с использованием датчика суммарного теплового потока.

Ниже приведены результаты расчетов зависимости относительной функции теплообмена

$$\Psi_k = (q_+ - q_-)/q_-, \quad (3)$$

где  $q_+$ ,  $q_-$  — плотности теплового потока в зоне горения с колебаниями охвоенной веточки и без них ( $q_- = 3,2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>), от колебательного числа Рейнольдса  $Re_k = v_k d / \nu$  ( $v_k = (\delta x) f$ ,  $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с — кинематическая вязкость воздуха):  $\Psi_k = 0; 0,15; 0,25; 0,56; 0$  при  $Re_k = 0; 4,9 \cdot 10^3; 7,8 \cdot 10^3; 13,1 \cdot 10^3; 15,0 \cdot 10^3$ .

Из приведенных данных следует, что до значений  $Re_k = 13,1 \cdot 10^3$  происходит воспламенение и горение системы ( $\Psi_k > 0$ ), а при  $Re_k > 13,1 \cdot 10^3$  наступает потухание, при этом частота колебаний  $f = 2,1$  Гц соответствует собственной частоте колебаний веточки. Явление резонанса обуславливает возрастание амплитуды колебаний системы и как следствие срыв пламени и прекращение процесса горения.

**7. Анализ результатов.** В работе [1] показано, что горение ЛГМ во фронте верхового лесного пожара происходит в диффузионном режиме. Поэтому механические колебания хвоинок и тонких веточек при определенных условиях могут увеличить приток тепла или кислорода к ним при зажигании в пологе леса хвоинки, в результате чего увеличится скорость горения лесных горючих материалов. В то же время, если скорость ветра очень велика, то процесс горения ЛГМ может прекратиться из-за чрезмерно больших тепловых потерь, обусловленных взаимодействием элементарного факела, окружающего горящий элемент ЛГМ, с относительно холодным потоком воздуха. Этот вывод следует из результатов, представленных в п. 6, а также из экспериментальных данных по зажиганию свежесорванных хвоинок и охвоенных веточек кедра, пихты и сосны (см. табл. 1.14, 1.15 в [2]). Сказанное выше согласуется с теоретическими результатами работы [1], в которой с использованием метода малых возмущений показано, что существуют нижний и верхний пределы распространения верхового лесного пожара по скорости ветра.

Из результатов [4, 5] и представленных выше экспериментальных данных следует, что механизм колебаний элементов ЛГМ (хвоинок и тонких веточек) согласуется с предложенным в [1, с. 152, 153].

Согласно [1] в пологе леса при отсутствии пожара устанавливается так называемая равновесная скорость ветра  $u_{*\infty}$ , которая отличается от невозмущенной скорости ветра  $u_\infty$  в приземном слое атмосферы. Поэтому для дальнейшего анализа используется значение  $u_{*\infty}$ . Полученное в [1] значение равновесной скорости ветра  $u_{*\infty} = 2,2$  м/с для хвоинки можно интерпретировать как нижний предел верхового лесного пожара. Это значение согласуется с результатами полунатурных экспериментов [9], в которых установлено, что низовой лесной пожар в сосновых молодняках переходит в верховой при скорости ветра 3 м/с.

**8. Выводы.** Разработана методика экспериментального исследования колебаний элементов лесных горючих материалов с использованием оптоэлектронной техники в ламинарном потоке воздуха. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими частотами эталонных консолей из стали и древесины сосны показало, что погрешность определения амплитуд и частот собственных и вынужденных колебаний составляет 15–22 %.

На основе экспериментальных данных по минимальной частоте колебаний и формулы (1) предложена методика определения модуля Юнга  $E$  и жесткости  $EI$  хвои и тонких веточек. Получены значения  $E$  и  $EI$  для хвои сосны, ели, кедра. В последнем случае установлено, что значения  $E$  и  $EI$  уменьшаются с ростом влагосодержания.

Экспериментально установлено, что взаимодействие элементов ЛГМ с потоком воздуха приводит к несимметричному отрыву потока, который вызывает колебания хвоинок и веточек с частотой  $f = 18 \div 25$  Гц, слабо зависящей от скорости потока и равной частоте собственных колебаний ЛГМ. Возрастание скорости потока приводит к увеличению амплитуды колебаний и может привести к турбулизации течения воздуха вблизи элементов ЛГМ. Доказано, что в спектрах частот колебаний могут возникнуть эффекты амплитудной модуляции результирующих колебаний, вызванные колебаниями системы типа веточка — хвоинки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992.
2. Гришин А. М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994.
3. Гришин А. М., Голованов А. Н. О влиянии малых акустических возмущений на процессы сушки, пиролиза и зажигания лесных горючих материалов // Сиб. физ.-техн. журн. 1992. Вып. 6. С. 102–106.
4. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в тепломассообменниках. М.: Наука, 1982.
5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984.
6. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Гостехтеоретиздат, 1953.
8. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесн. пром-сть, 1975.
9. Гришин А. М., Абалтусов В. Е., Веснин А. И. и др. Экспериментальные исследования механизма распространения верховых лесных пожаров и теплообмена фронта пожара с окружающей средой / Том. ун-т. Томск, 1982. Деп. в ВИНТИ 3.09.82, № 4873-82.