

## **ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В КАМЕРАХ ГАЗОПАРОВОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ**

В настоящее время процесс сушки древесины является одним из самых неавтоматизированных на территории бывшего Советского Союза. Так, в большинстве газопаровых установок контроль над влажностью сушильного агента производится по показаниям сухого и влажного термометров, находящихся внутри сушильной камеры, т. е. психрометрическим способом. Это требует периодического пребывания обслуживающего персонала в сушильной камере, заполненной влажным горячим воздухом, содержащим смолы и кислоты, которые испаряются с поверхности древесины, что является очень вредным для здоровья персонала [1].

Агрессивная среда камеры делает затруднительным выбор средств контроля влажности. Широко распространенные емкостные датчики влажности быстро загрязняются смолами, что приводит к деградации их свойств и выходу из строя. Несовершенство средств контроля влажности сушильного агента и, как следствие, отсутствие систем автоматического управления процессом сушки приводят к перерасходу тепловой энергии.

### **1. Основные параметры технологического процесса сушки древесины в лесосушильных камерах**

Сушка – процесс удаления влаги из материала путем ее испарения. Сушка пиломатериалов – одна из важнейших операций в технологическом процессе лесопиления и деревообработки. Сушка предохраняет древесину от поражения деревоокрашивающими и дереворазрушающими грибами в процессе изготовления и эксплуатации изделий из нее, а также улучшает качество склеивания и отделки древесины.

Конвективная газопаровая сушка называется камерной. Это основной промышленный способ сушки пиломатериалов, осуществляемый в лесосушильных камерах различных конструкций, куда пиломатериалы загружают штабелями. Сушка происходит в газообразной среде (воздухе, топочных газах, перегретом паре), которая путем конвекции передает теплоту древесине. Для нагревания и циркуляции сушильного агента камеры снабжают нагревательными и циркуляци-

опными устройствами. Согласно ГОСТ 19773-84 ОКСТУ5304 режимы сушки в камерах периодического действия делат. в зависимости от требований, предъявляемых к пиломатериалам, на мягкие, нормальные и форсированные. Режим сушки определяется температурой  $t$  (степенью насыщенности  $\varphi$  (относительной влажностью воздуха, деленной на 100 %) и психрометрической разностью  $\Delta t = t - t_m$ , где  $t_m$  температура смоченного термометра психрометра. Значения параметров конкретных режимов устанавливают в зависимости от породы, размеров, влажности и назначения высушиваемых пиломатериалов.

Режим сушки пиломатериалов в паровоздушной камере периодического действия характеризуется состоянием сушильного агента перед подачей его на высушиваемый материал. Это состояние изменяется периодически, по ступеням, в зависимости от влажности древесины, причем параметры агента остаются неизменными до перехода на следующую ступень. Влажность, при которой переходят со ступени на ступень, называют переходной влажностью. Число ступеней и значения переходной влажности устанавливают по таблицам режимов [2], одна из которых представлена ниже.

**Нормальные режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты и кедра**

Номер	Параметры режима	Толщина пиломатериалов, мм							
		до 22	от 22 до 25	от 25 до 32	от 32 до 40	от 40 до 50	от 50 до 60	от 60 до 75	от 75 до 100
>35	$t, ^\circ\text{C}$	83	79	79	75	73	71	64	55
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	9	7	6	5	5	4	3	2
	$\varphi$	0,68	0,73	0,77	0,80	0,80	0,83	0,86	0,90
35-25	$t, ^\circ\text{C}$	88	84	84	80	77	75	68	58
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	14	12	11	10	9	8	7	5
	$\varphi$	0,55	0,59	0,62	0,64	0,66	0,70	0,71	0,77
<25	$t, ^\circ\text{C}$	110	105	105	100	96	94	85	75
	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	36	33	32	30	28	27	24	22
	$\varphi$	0,24	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,33	0,34

Как видно из таблицы, режимы низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов хвойных пород предусматривают трехступенчатое изменение параметров сушильного агента со значениями переходной влажности древесины 35 и 25 %.

На рис. 1. графически представлен процесс сушки. До начала сушки материал прогревается, сначала с поверхности, а с течением времени  $t_1$  по всему сечению (участок АВ). Процесс испарения влаги в окружающую среду начинается лишь в условиях, когда давление пара

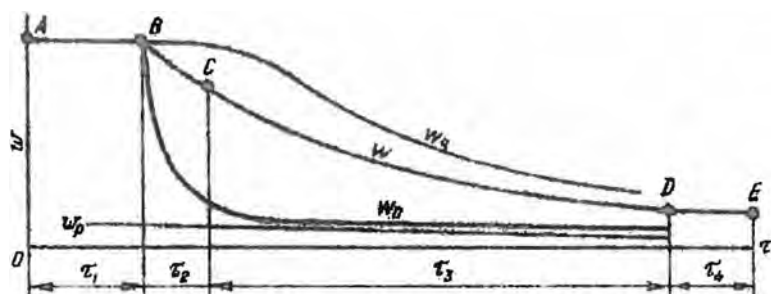


Рис. 1. Графическое изображение процесса сушки

$w_p$  — равновесная влажность воздуха,  $w_c$  и  $w_n$  — влажность в центре и на поверхности материала,  $w$  — средняя влажность высушиваемой древесины

на поверхности материала  $p_d$  превышает его давление  $p_n$  в окружающем воздухе, т. е. когда  $p_d > p_n$  (см. рис. 1). После прогрева с поверхности материала испаряется некоторое количество свободной влаги так же, как испаряется вода со свободной поверхности. Скорость испарения остается во времени неизменной, образуя *период постоянной скорости сушки* (участок BC). При достижении поверхностью материала влажности, соответствующей пределу гигроскопичности начнет испаряться связанная влага. Скорость ее испарения постепенно замедляется из-за уменьшения градиента влажности (участок CD) и повышения энергии связи. При достижении конечной влажности производится кондиционирование высушенного материала (участок DE) [3].

Данные особенности сушки вместе с отсутствием надежных датчиков влажности и вынудили разработчиков ГОСТа ввести ступенчатое изменение температуры сушильного агента. На наш взгляд, для экономии тепловой энергии путем поддержания оптимальной разности между давлением пара на поверхности древесины и парциальным давлением пара в сушильном агенте, необходимо изменять еще и скорость обмена воздушной среды в сушильной камере. При наличии датчиков температуры и влажности сушильного агента можно найти более экономные, чем гостированные, режимы сушки (критерий оптимизации — минимальный расход тепловой энергии при заданном времени сушки), которые будут отличаться плавными изменениями температуры сушильного агента и скорости его обмена. Очевидно, что по балансу влаги, т. е. суммарному весу уносимой воздухом из камеры испаряющейся воды, можно, зная объем и начальную влажность

древесины, определить и текущую влажность древесины, и принимать решение об окончании процесса сушки.

## 2. Анализ способов определения влажности воздуха

Как уже отмечалось, циркулирующая внутри сушильной камеры воздушная масса является агрессивной, что не позволяет использовать известные датчики, требующие для своей работы постоянного диффузного обмена молекулами с контролируемой средой. Поэтому необходимо использовать оптические методы контроля, в которых со средой взаимодействуют фотоны, а концентрация водяного пара определяется по изменению величины или прошедшего через среду, или рассеиваемого контролируемой средой потока. Известно несколько методов [4]: газоразрядный, оптико-акустический, метод прямого измерения поглощения, или абсорбционный, метод дифференциальной абсорбционной спектроскопии, метод комбинационного рассеяния, лазерно-флуоресцентный анализ и метод внутриврезонаторного лазерного поглощения. Наиболее простым и дешевым в реализации является абсорбционный метод, использующий избирательное поглощение проходящего через среду излучения колебательно-вращательными переходами молекул воды.

Молекула воды имеет несколько колебательно-вращательных полос поглощения, центры которых приближенно располагаются около 0,94, 1,1, 1,38, 1,87; 2,7; 3,2; 6,3 мкм. Для контроля влажности среды сушильной камеры целесообразно использовать полосы поглощения в ближней ИК-области спектра, в которой имеются соответствующие излучатели, приемники и возможно применение дешевых линз из обычного оптического стекла. Традиционное построение абсорбционного измерителя концентрации при наличии теплового или светодиодного источника излучения и использовании достаточно надежного дифференциального метода требует применения двух узкополосных интерференционных фильтров, один из которых должен пропускать излучение в максимуме полосы поглощения, а второй – на крыле. Также необходима механическая модуляция потока. Это усложняет оптико-механическую схему прибора и практически в два раза увеличивает его стоимость.

В настоящее время появилась возможность существенного упрощения оптико-механической схемы (что очень важно при использовании измерителя в производственных условиях) путем применения в качестве источника зондирующего излучения компактных полупро-

водниковых инжекционных лазеров. Новые технологии позволили освоить серийное производство этих лазеров, работающих в видимой и инфракрасной области спектра без охлаждения. Гарантированный срок их службы уже составляет более 10 тыс. часов. Хорошо освоено производство лазеров в области 1,33 мкм, поскольку они применяются в оптоволоконных линиях связи. При использовании отдельных образцов таких лазеров, способных перестраиваться по длине волны при изменении температуры его кристалла с помощью холодильника Пельтье в области около 1,35 мкм, где наблюдаются достаточно сильные линии поглощения молекул  $H_2O$ , появляется возможность создать компактный измеритель влажности воздуха с простой оптической схемой. К сожалению, многомодовость лазерных диодов, зависимость генерируемой ими мощности и частоты излучения от тока инжекции и температуры, а также возникающее в процессе эксплуатации загрязнение оптических поверхностей вызывают существенные затруднения при разработке приборов, метрологически надежных в производственных условиях эксплуатации. Поскольку использование полупроводниковых лазеров существенно упрощает и удешевляет высокоселективный анализ сложных газовых сред, то проводилось достаточное число научно-исследовательских работ [5-9], подтвердивших возможность осуществления на основе лазерной абсорбционной спектроскопии высокоселективного контроля над содержанием в воздухе различных веществ. Однако на практике создан лишь ряд макетов, которые по вышеуказанным причинам так и не нашли применения за стенами лабораторий. Для налаживания серийного выпуска требуемых средств непрерывного контроля необходимо разработать эффективный метод обработки получаемого в процессе измерений массива данных, позволяющий устранить влияние ряда дестабилизирующих факторов.

### **3. Модифицированный корреляционный метод**

Наиболее перспективными для создания систем непрерывного контроля влажности являются корреляционные методы анализа. Применение при контроле влажности методов корреляционной лазерной спектроскопии [10] позволяет устранить ряд факторов, снижающих метрологическую надежность приборов. Но пристальный анализ характеристик приборов, создаваемых на основе этих методов, показывает, что при этом не устраняется влияние диссипативных потерь, к которым можно отнести изменение коэффициентов передачи прием-

но-передающих трактов, загрязнение оптических поверхностей, флуктуации коэффициента пропускания и рассеяния среды и т. п. Для их устранения предлагается модифицировать корреляционный метод, используя в качестве информационного сигнала отношение принимаемых на двух разных длинах волн потоков.

Рассмотрим систему непрерывного контроля, использующую перестраиваемый полупроводниковый лазер. Излучение диода коллимируется малогабаритной линзой и отправляется на контролируруемую трассу длиной  $L$ . Отражатель возвращает падающее на него излучение обратно. Приемная линза, расположенная на одной оптической оси с передающей, фокусирует попадающее на нее зондирующее излучение на чувствительную площадку фотоприемника. Зондирующее лазерное излучение дважды проходит сквозь контролируемую газовую среду и несет информацию о ее спектральном поглощении. Управляющим длиной волны излучения лазера фактором могут являться температура кристалла лазера, ток инжекции, угол наклона дифракционной решетки и т. д.

После прохождения трассы длиной  $L$  поток зондирующего излучения, приходящий на фотоприемник, можно записать, используя закон Ламберта – Бера, в виде

$$\Phi_i(\Delta\Theta) = \alpha_i \sum_{i=0}^k \Phi_i(1 + m_i \Delta\Theta) \exp\{-k_a[\nu^*(\Delta\Theta)]P_a L\}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент, учитывающий суммарные диссипативные потери;  $\Phi_i(1 + m_i \Delta\Theta)$  – поток  $i$ -той моды излучения лазера с коэффициентом изменения мощности  $m_i$ ;  $k_a(\nu^*)$  – линейный коэффициент поглощения ( $\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ );  $\nu^*$  – частота излучения в обратных сантиметрах ( $\text{см}^{-1}$ );  $P_a$  – парциальное давление газа в атмосфере (атм),  $\Delta\Theta$  – изменение фактора перестройки длин волн. Последнее выражение при малых величинах  $m_i \Delta\Theta$  и слабом поглощении контролируемого газа можно упростить, применив хорошо известное разложение экспоненты в степенной ряд

$$\begin{aligned} \Phi_i(\Delta\Theta) &= \alpha_i \sum_{i=0}^k \Phi_i(1 + m_i \Delta\Theta) \{1 - k_a[\nu^*(\Delta\Theta)]P_a L\} \approx \\ &\approx \alpha_i \Phi_i \exp\{-k_a[\nu^*(\Delta\Theta)]P_a L - m_i \Delta\Theta\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k = \frac{\Phi}{\Phi_1} k [v^*(\Delta\Theta)]$  — нормированный линейный коэффициент поглощения, учитывающий относительную мощность излучения каждой моды;  $\Phi_2 = \sum_{i=1}^r \Phi(\Theta_i)$  и  $m_2 = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} m_1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2} m_1 + \frac{\Phi_2}{\Phi_1} m_1$ .

Из выражения (2) следует, что прямое использование корреляционного метода требует учета коэффициента диссипативных потерь  $\alpha_d$  модового состава излучения полупроводникового лазера и зависимости излучаемой им мощности от параметров, управляющих длиной волны излучения. Возникающие из-за незнания  $\alpha_d$  погрешности даже при проведении периодической калибровки аппаратуры будут намного превышать пороговую чувствительность определения концентрации контролируемого компонента.

Для модифицированного корреляционного метода в процессе калибровки регистрируются два сигнала: первый — при наличии анализируемого вещества с известным парциальным давлением  $P_k$

$$\Phi_{L_k}^{(k)} = \alpha_k \Phi_1 \exp\{-k_{on}[v^*(\Delta\Theta)]P_k L_k + m_2 \Delta\Theta\}, \quad (3)$$

второй — с другой удвоенной длиной трассы при калибровке  $L_k$

$$\Phi_{L_k}^{(k')} = \alpha_k \Phi_1 \exp\{-k_{on}[v^*(\Delta\Theta)]P_k L_k + m_2 \Delta\Theta\} \quad (4)$$

В процессе измерений на реальной трассе с удвоенной базой  $L$  будет регистрироваться сигнал

$$\Phi_L^{(k')} = \alpha_{r_0} \Phi_1 \exp\{-k_{on}[v^*(\Delta\Theta)]P_0 L + m_2 \Delta\Theta\}, \quad (5)$$

где  $P_0$  — искомое парциальное давление.

Поскольку коэффициенты  $\alpha_k$ ,  $\alpha_k'$  и  $\alpha_{r_0}$  неизвестны, необходим алгоритм вычисления  $P_0$ , в котором эти постоянные исключаются. Для этого вначале формируем образ калибровочного сигнала  $y(\Delta\Theta)$ , который не содержит коэффициентов диссипативных потерь, а при измерениях аналогичным способом формируем образ измерительного сигнала  $x(\Delta\Theta, \eta)$ , где  $\eta$  — параметр, описывающий возможный частотный сдвиг излучения из-за нестабильности поддержания параметров перестройки частоты лазера. Затем, применив корреляционную обработку можно найти оценку амплитуды образа измерительного сигнала, по которой рассчитывается искомое парциальное давление.

Чтобы найти окончательное выражение для определения парциального давления, необходимо исключить влияние возможного сдвига зависимости частоты излучения лазера от параметра перестройки  $\Delta\Theta$  относительно записанной при калибровке. Это достигается путем опи-

ределения максимального значения нормированной взаимно-корреляционной функции

$$A = \max_t |A(t)| = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \chi(\Delta\theta) \varphi(\Delta\theta) d(\Delta\theta)}{\int_{-\infty}^{\infty} \chi(\Delta\theta) d(\Delta\theta)} \quad (6)$$

Из последнего выражения получается удобная формула для вычисления  $P_n$

$$P_n = \frac{P_1 P_2 - \Delta L_1 \Delta L_2 - I_1 I_2}{I} \quad (7)$$

Отметим, что модифицированному корреляционному методу присущи метрологическая надежность и эксплуатационная устойчивость. В этом методе исключаются влияние загрязнения оптических поверхностей, изменения коэффициента передачи усилителей и т. п. Также исключаются погрешности, вызываемые нестабильностью поддержания средней температуры кристалла лазера. Точное определение концентрации контролируемого газа возможно в большом диапазоне при калибровке газоанализатора только по одному значению концентрации калибровочной смеси.

#### 4. Оптическая и функциональная схемы лазерного измерителя влажности агрессивного паровоздушного потока

Поскольку влажность выбрасываемого в атмосферу отработавшего теплоносителя большая (см. таблицу), то при стандартных режимах сушки можно использовать короткие измерительные базы (около 10 см). Тогда измеритель влажности можно размещать непосредственно на трубе, через которую выбрасывается паровоздушный поток. Один из возможных вариантов функциональной схемы измерителя влажности представлен на рис. 2. Для упрощения конструкции прибора излучающая и приемная оптические системы выполняются соосными и располагаются в одном блоке. Для упрощения юстировки применяется световозвращатель (отражатель), который посылает обратно приходящее на него излучение лазера. Такая схема не требует при монтаже прибора на трубе тщательной юстировки. Достаточно лишь направить луч лазера на отражатель. Выбором расстояния от лазера до линзы излучающей оптической системы формируют не-



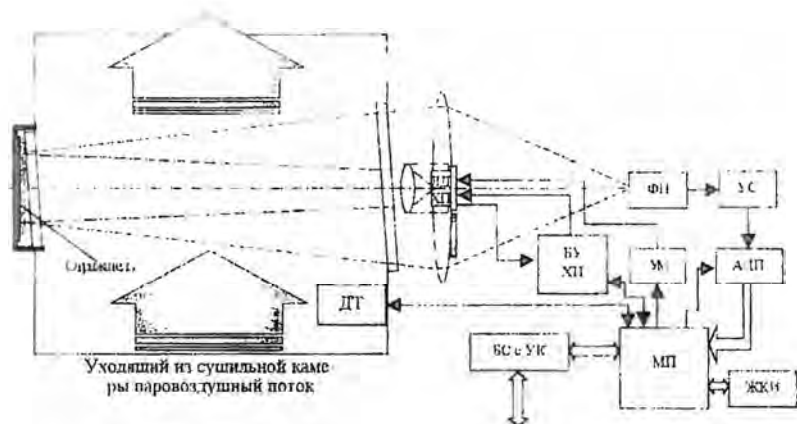


Рис. 3. Оптическая и функциональная схемы лазерного контроля влажности воздушного потока при конвективной парогазовой сушке древесины.

ФП – фотоприемник; УС – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БУ ХП – блок управления температурой лазера с помощью встроенного холодильника Пельтье; УМ – усилитель мощности, обеспечивающий формирование по сигналу микропроцессора импульса тока для включения лазерного диода; БС с УК – блок связи микропроцессора с управляющим компьютером; МП – микропроцессор; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; ДТ – цифровой датчик температуры; ЛД – лазерный диод; ХП – холодильник Пельтье.

сколькo расходящуюся диаграмму направленности лазерного излучения. Это позволяет собрать на приемнике излучения ФП достаточную часть отраженного обратно лазерного излучения.

В предлагаемой схеме используется перестраиваемый полупроводниковый лазер. Перестройка лазера по длине волны осуществляется изменением температуры кристалла лазера с помощью встроенного в корпус лазера миниатюрного холодильника Пельтье. Блок управления им по командам микропроцессора изменяет температуру кристалла лазера по пилообразному закону. Контроль правильности формирования закона изменения температуры осуществляется с помощью полупроводникового терморезистора, размещаемого рядом с кристаллом лазера. Сигнал с фотоприемника поступает на усилитель, а затем на аналого-цифровой преобразователь и в виде цифрового кода – на микропроцессор. Жидкокристаллический индикатор служит для индикации режимов работы и данных. Связь микропроцессора с управляющим компьютером осуществляется с помощью блока связи микропроцессора с управляющим компьютером.

## 5. Основные параметры лазерного измерителя влажности

При макетировании лазерного измерителя влажности использовался полупроводниковый лазер, изготовленный в НИИ «Полюс» (г. Москва), со структурой РО-ДГС и подложкой  $p$ -типа. Проведенные исследования его характеристик позволили выбрать его рабочий режим со следующими параметрами: ток лазера 35 мА, интегральная мощность излучения 3 мВт, средняя температура кристалла лазера  $+30^\circ\text{C}$ , средняя длина волны излучения основной моды 1,3544 мкм. Спектр излучения лазерного диода в указанном режиме изображен на рис. 3. Хорошо видно, что вклад четырех побочных мод не превышает 5% от общей мощности излучения лазера. Коэффициент перестройки частоты излучения при изменении температуры для этого лазера составляет 0,13 нм на один градус. Необходимо иметь в виду, что вследствие недостаточного разрешения используемой спектральной аппаратуры полученная полуширина мод (см. рис. 3) гораздо больше истинной.

Путем регулировки величины среднего тока через встроенный холодильник Пельтье подбиралась такая температура кристалла лазера, при которой средняя длина волны излучения совпадала с максимумом одной из линий поглощения молекул воды в области около 1,3544 мкм. Спектр поглощения паров воды для стандартных значений температуры и влажности сушильного агента в области от 1,3527

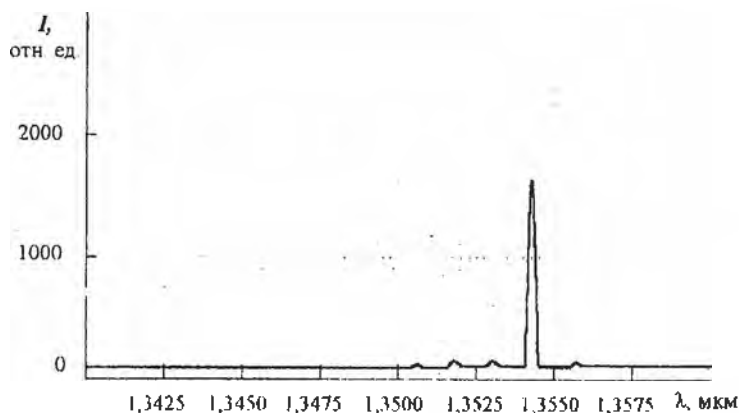


Рис. 3. Спектр излучения лазера при токе инжекции 35 мА и температуре  $+30^\circ\text{C}$ .

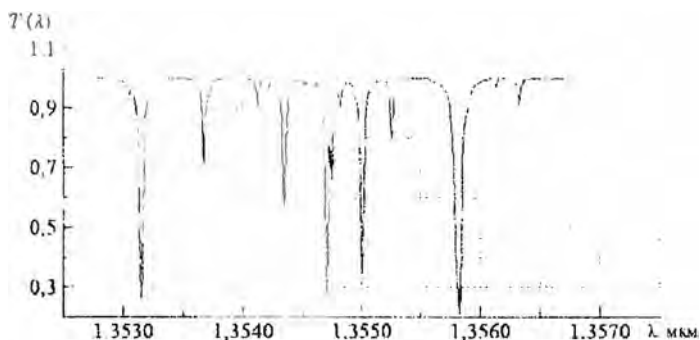


Рис. 4 Спектр пропускания паров воды при температуре  $+80^{\circ}\text{C}$  и парциальном давлении 0,4 атм

до 1,3567 мкм показан на рис. 4. Для сканирования контура выбранной линии поглощения осуществлялось изменение температуры лазера по пилообразному закону. Поскольку ширина линии излучения лазера гораздо меньше ширины линии поглощения  $\text{H}_2\text{O}$ , то получаемый при сканировании контур, хорошо совпадает с расчетным.

В качестве приемника излучения использовался германиевый фотодиод с размерами чувствительной площадки  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  и пороговой чувствительностью  $10^{10} \text{ Вт/Гц}^{-1/2}$ .

Характеристики разрабатываемого измерителя влажности оценивались путем численного моделирования процессов, происходящих при сканировании выбранным лазером линии поглощения паров воды с максимумом 1,35435 мкм. Полагалось, что расстояние от лазера до отражателя – 10 см, спектральная плотность мощности шумов усилителя –  $10^{-12} \text{ Вт/Гц}^{-1/2}$ , полоса частот, усиливаемых используемым усилителем, составляет  $10^3 \text{ Гц}$ . С целью учета потерь считалось, что на чувствительную площадку фотоприемника попадает 10 % мощности лазера. Применялась модифицированная корреляционная обработка имитируемых сигналов, также калибровка измерителя влажности осуществлялась при небольшом парциальном давлении паров воды, т. е. произведение  $P_0 L$  считалось равным 0,5 см. Для этих условий получена расчетная зависимость определяемого произведения парциального давления паров воды на длину измерительной трассы  $Pl$  от его истинного значения  $P_0 l_0$  при разных вкладах в общую мощность боковых мод  $m$ , которая представлена на рис. 5. Хорошо видно, что наблюдается неплохое совпадение между рассчитываемыми и истин-

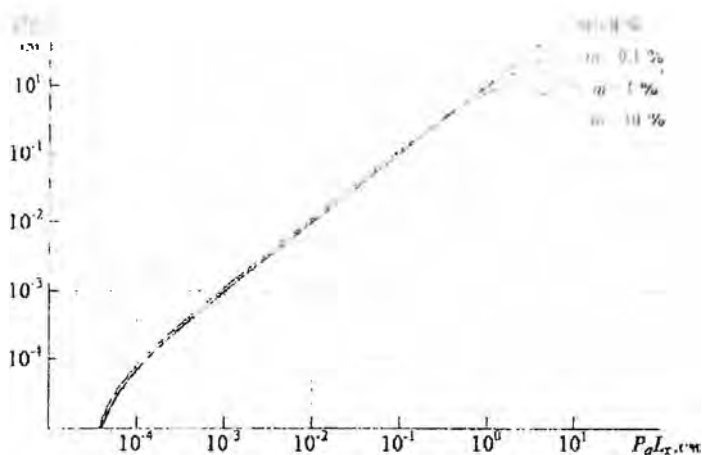


Рис. 5. Расчетные зависимости определяемых значений  $PL$  от истинных  $P_0 L_x$  при разных вкладах боковых мод  $m$

ными значениями в пределах их изменений от  $10^{-4}$  до 1 см. Нарушение линейности в левой части графика (при малых  $P_0 L_x$ ) объясняется возрастающим вкладом шумов фотоприемного устройства, а расхождения в правой (при больших  $P_0 L_x$ ) – искажениями регистрируемого контура линии поглощения по сравнению с зарегистрированными при калибровке, которые возникают за счет вклада боковых мод лазера при больших значениях  $P_0 L_x$ . Используя при калибровке среду с большим парциальным давлением паров воды или уменьшая длину контролируемой трассы, можно увеличивать диапазон линейности.

Таким образом, в ходе проведенных нами исследований показано, что применение разработанного модифицированного корреляционного метода лазерной спектроскопии в средствах непрерывного контроля влажности теплоносителя в камерах газопаровой сушки древесины устраняет влияние на результаты измерений основных дестабилизирующих факторов и позволяет придать создаваемым приборам метрологическую надежность. Внедрение оборудования для непрерывного контроля температуры и влажности сушильного агента даст возможность автоматически поддерживать оптимальные режимы сушки, что улучшит условия труда обслуживающего персонала, а главное – снизит расход тепловой энергии и повысит качество пиломатериалов.

### Интература

1. *Боголюбов Л. С.* Автоматизация процессов сушки древесины (Обзор) М. 1970 31 с.
2. Справочник по сушке древесины / Под ред. Е. С. Богданова М. Лесная пром-сть, 1990 303 с.
3. *Кречетов Н. В.* Сушка древесины 3-е изд. М. Лесная пром-сть, 1980. 432 с.
4. Спектральный анализ неорганических газов / В. М. Немец, А. А. Петров, А. А. Соловьев и др. Л.: Химия, 1988 240 с.
5. *Демтредер В.* Лазерная спектроскопия. Основные принципы и техника эксперимента М. Наука, 1985 608 с.
6. Аналитическая лазерная спектроскопия / Под ред. Н. Оменетто М.: Мир, 1982 590 с.
7. *Nadzhdminski A. I., Prochorov A. M.* Modern trends in diode laser spectroscopy // Proc. SPIE 1992 Vol 1724, P. 2-62.
8. *Ramon U. Martinelli.* Mid-infrared wavelengths enhance trace-gas sensing // Laser Focus World, March 1996 P. 77-81.
9. *Фирого В. А., Манок И. С.* Пути развития высокоселективных трассовых газо-аналитических средств для экологического мониторинга и управления технологическими процессами // Тезисы докладов Межгосударственной научно-технической конференции. Мн. БГУ, 1996. С. 57-59.
10. Лазерная аналитическая спектроскопия / В. С. Антонов, Г. И. Беков, М. А. Большов и др. М. Наука, 1986. 318 с.