

综述

世界林产品研究的进展与动向

陈绪和 石军莉

(中国林科院木材工业研究所 北京 100091)

国际林联第二十届世界大会 1995 年 8 月 7 日至 12 日在芬兰坦佩雷召开。“林产品”学部此次共汇集邀请论文 144 篇,墙报论文 72 篇。讨论的重点包括:木材质量的天然变异;热带材天然耐久性的变异;营林措施对木材质量的影响;最终用户对木材性质的需求;木材作为工程材料在建筑上的应用;木材防腐、阻燃、干燥、制材、胶粘剂和胶合技术的新进展;废材的循环利用和再生制品;木材与水泥、塑料、玻璃纤维及其它材料的复合材料;木材的物理、化学改性;环境对林产品市场的影响;林产品用于能源生产;木材生物量的化学利用;热带林产品的社会经济影响等。

从林产品学部发表的论文可以看出该学科领域的主要发展趋势有三:

①林木的定向培育和优化利用,将营林—材性—最终用途的研究相结合。

②发展改善环境的技术,如发展各种低甲醛释放量的胶粘剂,发展人造板循环回收利用技术等。

③新技术的应用,如计算机技术、信息技术大量用于木材科学技术的研究;用激光刻痕提高木材浸渍处理效果等。

下面按木材性质及利用、人造板技术、胶粘剂和胶合技术、循环利用技术以及能源等几方面介绍世界林产品研究的新进展及动向。

1 木材性质及利用

许多林业科学家都在研究林木栽培措施、木材性质和木材质量的关系。此类研究常以现有的木材分等规范为基点,但分等规范仅反映某些用途对材性的要求。不同的最终产品对材性的要求差别很大,对结构材而言,木材的物理力学性质与最终用户的满意程度是同等重要的。建筑工业用锯材性能视不同的最终用途可用不同方法表达,如用作地板结构的木梁,其力学性能的主要控制指标是刚度,而用于

屋顶结构的木材,其主要要求指标是强度。在林业研究中,木材的密度常用于表示木材的强度和刚度,但对柱材而言,直度是最重要的工艺因子,而木材的密度并不重要。直度是建筑用锯材最重要的指标之一,目前生产的锯材质量不能令建筑业满意的主要原因是锯材的翘曲变形不利于现场装配。因此,研究木材翘曲变形的机理和防止翘曲变形就显得非常重要。

为改善木材的渗透性和耐久性,日本 Nobuaki Hattori 等人采用 1.7kW 二氧化碳激光刻痕。该研究的目标是确定脉冲激光束在木材上打孔的照射条件,通过测量从激光在木材上打出的小孔流过的流体确定适宜的刻痕模式。试材为经微波干燥的 120mm×120mm 柳杉方材。对 90mm×90mm 的柳杉、铁杉、花旗松方材,打孔深度为 90mm 以上小孔所需的脉冲激光束的照射能量为 204 焦耳(1200W×0.17s)到 312 焦耳(1200W×0.26s)。如需将环烷酸铈从小孔的穿透面积为木材断面面积的 90%以上,可渗透树种木材(柳杉、铁杉、花旗松)的刻痕密度必须分别在 5×10^3 、 6.7×10^3 、 4.4×10^3 孔/m² 以上,比不刻痕的可渗透树种分别提高 20%~50%^[1]。

柚木有良好的耐久性和装饰性,是多用途的锯材和装饰单板树种。对速生柚木材性的主要要求是干形直、削度小、节疤少、幼龄材和应拉木比例低、心材比例高、密度和强度适中。K. M. Bhat 的研究表明,林木生长—材性—产品性能之间的关系相当复杂。栽培措施和遗传选择不同,木材形成模式差别很大。

热带森林的破坏和珍贵树种的减少使国际单板和胶合板工业必须考虑能否用欧洲的木材代替。Markus Hecker 和 Gero Becker 的研究结果表明欧洲花旗松可用于刨切和旋切单板。单板的表面质量与木材的内部结构有关,宽年轮木材单板表面质量高,这与锯材年轮狭的质量高的结论正好相反^[2]。

目前世界范围内正发展低种植密度人工林,其特点是树木幼龄阶段速生,株、行距大,这对木材特

收稿日期 1995-11-03

征和木材相关质量均有影响,其它影响木材性质的重要因子是遗传变异和栽培立地条件。德国正对其西南部生长的 80~100 年生花旗松木材性质与生长条件之间的关系进行深入研究。研究的主要因子包括年轮指标、木材密度、幼龄材的比例、材内节疤、木材的力学性能等^[3]。

木材的一些缺陷如干缩、湿胀、易腐、易燃等给木材加工和利用带来了许多困难,多年来,木材科学工作者一直在努力研究和积极探索克服这些缺陷的方法,并取得了一些效果,近年来对这方面的研究日益深入。

L. Wall Ström 用不同分子量的聚乙二醇(PEG-200 和 PEG-1500)、季戊四醇和甘油浸泡木材以提高木材的尺寸稳定性。在 PEG-1500 中加入钾用于判断 PEG-1500 在木材中的分布情况。结果表明,用甘油浸泡后的木材在环境湿度变化条件下尺寸稳定性非常好,其它有机物,尤其是季戊四醇处理后的木材的尺寸稳定性不如甘油。利用扫描电镜(SEM)测定胞壁的结果表明,胞壁厚度的增加使处理后的木材尺寸稳定性提高。一般说,有机物在胞壁的渗透深度越大,则尺寸稳定性越好,PEG-200 比 PEG-1500 的渗透深度大^[4]。

随着热带森林资源的减少,对欠利用树种的开发利用日益重要。橡胶木是欠利用树种中的一种重要资源,经常规防腐处理后有很好的利用价值。T. K. Dhamodaran 对乙酰化处理橡胶木改进木材尺寸稳定性和抗生物降解能力进行了研究。他指出,当乙酰吸收量(WPG)达 22%时,木材可获得较好的抗生物降解能力,木材抗缩率(ASE)可达 85%~88%。乙酰化处理对木材的物理力学性能也有一定影响:吸收量增加时,抗弯强度(MOR)稍有下降(但不影响使用),对抗压强度没有影响。总之,乙酰化处理是对环境有益的处理技术,能有效地提高橡胶木的防腐能力和尺寸稳定性^[5]。

Cristina Timar 和 Daniela Mihai 报道了山杨木锯末及实木同顺丁烯二酐(MA)进行酤化反应的结果以及与结果有关的内容和化学过程的控制。酤化反应通过冷法和热法进行。处理后化学结构的变化可以通过红外照射(IR)光谱记录以及一些化学分析预测,这些分析包括酸、皂化值的测定及改性木材中单酤和双酤浓度的数理推算。可获得的单酤浓度为 6%~20%,双酤浓度为 0~13%。作为单酤加入木材的 MA 与 MA 总量的百分比为 54%~100%。酤化的不侵性质和木材的抗吸湿性由一些特殊试验,

在保持 100%空气湿度和 20℃完全浸水的条件下得出结果,这些试验指出改性后的实木有较低的吸湿性^[6]。

对木刨花进行化学处理是提高刨花板和其它木质复合材料尺寸稳定性有前途的一种方法。Jovan Miljkovic 等对松木和水青冈木片用乙酸酐进行了乙酰化处理,两种木片在浓度为 15.3%~22.5%的乙酸溶液中处理 0.5~4 小时。乙酰化处理后的木片吸湿性和可湿性随乙酰化程度的增加而减小,红外光谱表明了乙酰化的结果,在 1730cm⁻¹处有一高峰值,在 1210cm⁻¹处有一显著峰值。乙酰化的结果不但在红外线吸收带而且在润湿接触角上表现出来,Jovan Miljkovic 还测定了木材组织中乙酰的浓度和在 1730cm⁻¹VS、1030cm⁻¹VS 及 1210cm⁻¹VS 处的吸收系数之间的关系。结果表明,乙酰化木材的红外吸收带在预测其可湿性方面能提供有用的信息^[7]。

2 人造板技术

近年来世界上对无胶人造板,水泥刨花板的研究有较大进展。

Alexander Elbert 对无胶中密度人造板技术进行了研究和改进。制造工艺包括木材废料切削、分选、干燥、刨花专门加工、铺装、热压、后处理。成板密度 800~850kg/m³,抗弯强度 10~15MPa,24 小时吸水厚度膨胀率 4%~6%,热压时无有害物质释放。刨花的专门预处理使木材组分中的胶粘物质活化,在热压时实现胶合成板。一种已知的无胶压板技术系热压后保压冷却,成板密度为 1350~1400kg/m³。而本技术的优点是成品板为中等密度,且无需在压机中冷却成板,尤其是经济效益显著,无环境污染,成板可用于室内装修及作保温建筑材料^[8]。

北美建筑工业要求建筑用人造板如定向刨花板具有良好的阻燃和机械性能。目前北美生产的水泥刨花板采用波特兰水泥,水泥与木材的结合所需的固化/水化时间比树脂刨花板/定向刨花板长得多。具有良好结构性能的阻燃水泥人造板的生产受到经济方面的制约。

采用专有技术在现有定向刨花板生产线上增加附加的搅拌设备即可生产定向水泥刨花板,其产量按体积计与定向刨花板相当。木材与水泥的重量比为 1:1,成品板的密度为 750kg/m³,与普通刨花板和中密度纤维板相当。板的生产工艺与标准定向刨花板相同,只是刨花要先与专门配置的镁水泥(Pyrotite)拌合,然后再施以聚异氰酸酯树酯(MDI),板

的热压时间低于 16s/mm。

自 80 年代初菲律宾发展水泥刨花板以来其生产技术不断发展,近年来需求量不断增加,甚至供不应求。目前存在的一个主要问题是生产周期长,需 21~28 天才能充分固化,因此,需要尽快发展快速固化技术。一种最有前景的方法是热压时注入二氧化碳,其优点是加压几分钟后板即可达卸压所必需的初强度,另一个优点是减少了原材料对水泥阻凝的影响。

这种快速固化工艺是先将木材削片后浸水 2 天,然后在环境温度下干燥,将含水率降至 30% 以下。木材、水泥、水、促凝剂按比例充分混合均匀,成型后热压,热压时板坯注入二氧化碳。压板温度采用 30,45,60,75℃,二氧化碳注入时间为 5,10,20min,促凝剂分别采用硅酸钠、氢氧化钠、硫酸铝(用量为 3,5,10%)。采用二氧化碳注入法制得的水泥刨花板的抗弯强度和刚度分别为常规技术压制板的 2~2.8 倍,其压制时间大为缩短,板的初强度显著提高。热压温度对水泥水化和缩短压制时间影响显著。

3 胶粘剂和胶合技术

木材胶粘剂的研究和发展始终与甲醛释放量的控制紧密联系在一起,如何控制甲醛释放量是对木材工业的一个挑战。为了减少甲醛释放量,木材胶粘剂例如低摩尔比的脲醛(UF)树脂、三聚氰胺改性 UF 树脂,快速固化酚醛树脂以及异氰酸酯树脂等发展很快。近年来,一些新技术不断应用于胶粘剂工业,生产出一些新的胶粘剂,这些新的胶粘剂扩大了木材胶粘剂的范围,减少了木材产品的胶料费用,而且大大增强了木材胶粘剂的作用。

从花生壳、松树皮和山核桃壳粉末中提取的碱性水基产品成功地代替了酚醛树脂中 80% 的苯酚,此外,这些快速固化的共聚体树脂可以通过与低于 10% 的间苯二酚接枝制成室温固化胶粘剂。1971 年以来金合欢树单宁木材胶粘剂就已投入商业化生产。但是后来一种含有南方松树皮单宁的指接胶粘剂得到发展,其中这种单宁在两组分胶粘剂中取代了 50% 的间苯二酚树脂(PRF)。通过调节胶液的 pH 值以控制反应活性的方法,用单宁萃取物已经在工业上生产出胶合质量良好的刨花板^[9]。

对各种木素在胶合板和 OSB 胶粘剂中替代 50% 的 PF 固体树脂作了评估,木素还作为 UF 树脂的甲醛捕捉剂以及用于改进胶层的质量。加入 MDI 能增加羟甲基化的、硫酸盐木素的交联度以及改进

胶的胶合强度。

碳水化合物与苯酚及尿素反应成室外用热固型胶粘剂,接枝于碳水化合物-苯酚树脂的间苯二酚,被用于热压条件下高含水率单板的胶合及冷压条件下层积材的胶合。麦芽糖糊精与酚醛(PF)预聚体反应得到的淀粉共聚体也可获得极好的胶合质量。

酯化或甲基化木质纤维质材料在高温的有机溶剂中可被液化,与 NaOH 中和以后,与甲醛溶液反应形成甲阶酚醛树脂木材胶粘剂。最近,从热解生物油中提取的苯酚化合物成功地用于代替 PF 树脂中 50% 的苯酚。

核磁共振(NMR)在木材胶粘剂性能方面的应用继续得到发展。最近,新发展的苯酚-三聚氰胺-甲醛树脂(PMF)和苯酚-尿素-甲醛树脂(PUF)共缩树脂的结构特征利用二甲基甲酰胺洗脱液通过 C-13 核磁共振波谱和凝胶渗透色谱(GPC)得到改进。苯酚环同尿素剩余物及三嗪环之间的共缩作用由亚甲基碳的共缩而完成,由此可以判断 MUF 树脂的共缩,此外,通过 C-13 浓缩甲醛可以确定对这些树脂进行共缩的合成方法,这导致最优合成及固化方法的进展,这种固化是通过这些树脂中亚甲基与二亚甲基的共缩反应而完成。共缩的甲醛树脂固化过程中以及固化过程后的动力学机械性质通过扭转带分析法来分析,这种方法能确定固化条件和树脂的共缩作用,此外,这种分析确定了固化树脂共缩作用对热阻性的影响。固化的 MF、PF 和 PMF 树脂的耐久性同固体 C-13NMR 波谱形成对比^[10]。

用 UF、MUF、PMUF 对木材胶接时进行交联及固化的等温及不等温热机分析(TMA),用于确定木材胶接的物理性质的变化,同时,通过热机分析可以研究三种胶的凝胶点温度或熔化温度及其对应不同变化温度下的最大弹性模量,还可描述胶的固化速率,固化剂数量多少对弹性模量的影响及固化温度的推算过程。在生产木材组合件时,胶的固化过程及其强度的变化在确定合适的工艺方面起着决定性作用。TMA 法在确定胶在木材中固化时物理性能变化特点方面是行之有效的,同时,该法可用于易加工木材一胶粘剂试样模块,并且胶的渗透、熔化及固化信息可以很方便地从 TMA 热线中推算出来。该法有望被广泛用于研究木材/胶粘剂系统,用来验证胶的固化过程及与木材的相互作用。

1994 年,北美约有 1.2×10^6 t 的固体树脂被用于木制品的胶合。胶粘剂原材料价格的全球性上涨使胶粘剂的价格相应上涨。在北美,环境因素包括减

少易挥发有机化合物,如苯酚、甲醇、甲醛、醛酸盐、异氰酸酯单体等的释放量等对胶粘剂的发展起着重要的作用。改进化学配方、反应化合物添加剂以及较好的共聚物是改进胶粘剂的主要方法^[11]。

市场日益扩大的新型木质工程材料刺激了加工设备如涂胶机、热压机、模压设备以及释放量控制等的改进。这些设备更快速、高效和专业化,对胶粘剂也提出新的要求,如粉状胶、自脱膜胶粘剂等,并要考虑减少磨损、贴面材料、工艺设备、高湿原料、天然增充剂、国际标准、循环利用以及人员培训等方面的需求。总之,这些新发展使胶粘剂质量、胶合过程以及胶合木制品的竞争能力得到提高^[11]。

欧洲木材胶粘剂是在减少人造板,尤其是刨花板中游离甲醛含量的基础上发展的,最新标准规定甲醛释放量的极限值是约 0.025ppm,即穿孔值为约 2mg。

过去十五年减少甲醛释放量的最有效途径是降低 UF 树脂中 F 与 U 的摩尔比或 MUF 树脂和三聚氰胺改性 UF 树脂中 F 与 $(\text{NH}_2)_2$ 的摩尔比,为进一步减少甲醛释放量,需要继续降低摩尔比,例如, MUF 树脂中 F 与 $(\text{NH}_2)_2$ 的摩尔比可以达到 0.9。还可以通过采用合适的固化条件,尤其是对刚从压机上卸下来的板子进行热堆放使树脂中的游离甲醛被吸收,关键是减少碱含量和降低树脂过高的反应活性。单宁树脂含有多酚结构,具有与酚醛树脂相似的性质,固化条件合适时,甲醛释放量几乎为 0。

1990 年,日本胶粘剂产量创历史最高记录,达 $1.32 \times 10^6 \text{t}$,但是由于需求量的减少使 1993 年的产量减少到 $1.20 \times 10^6 \text{t}$ 。胶粘剂的主要产品为热固型树脂,如胶合板工业中的 UF、MUF、PF 和细木工用的 PVAC 乳剂(聚酯酸乙烯),木材胶粘剂占 1984 年胶粘剂产品需求量的 67.4%,1993 年降至 49.3%,这是由胶合板产量减少而引起的。最近,木材胶粘剂市场上水溶性聚异氰酸酯胶粘剂和交联的 PVAC 需求量增加,据估计,市场上对这些胶粘剂的需求会继续增加,不仅因为这些胶是水溶性的,用起来十分方便,而且它们具有极好的耐久性。

1990 年中国木材胶粘剂的消费量超过 $0.21 \times 10^6 \text{t}$,预计 2000 年对木材胶粘剂的需求将为 $0.44 \times 10^6 \text{t}$,木材胶粘剂主要为热固型树脂,例如:UF、PF 和 MF。1990 年 UF 的消费量占市场总消费量的 78%,其次是 PF,为 15.8%,MF 为 5.7%,甲醛的产量将继续成为影响木材胶粘剂工业的主要因素^[12]。

在印尼和马来西亚等一些热带国家,由于胶合

板工业的发展,木材胶粘剂的消费量近几年来迅速增加,与热带雨林消耗有关的环境问题将成为亚洲热带地区木材工业发展的主要影响因素^[12]。

4 循环利用技术

在木材资源日益减少的今天,对林产品进行循环利用已成为一个迫在眉睫的问题。旧人造板产品特别是废弃家具已成为目前废料处置的大问题,解决其循环回收利用将有助于显著减少废料处置问题。

这些制品的组分在过去 40 年中一直不断变化,新型人造板和表面材料一直不断涌现,从废家具中回收木材的中心问题是材料的分离。

目前已经开发了一种经济、生态、化学—热—机械方法以回收未损坏的木纤维和刨花,包括金属、表面和封边材料的分离。全部用回收材料制得的刨花板和中密度纤维板在技术指标和甲醛释放方面未见与常规人造板有何差异。

包括德国在内的几个国家已制订法律回收木质人造板以减少作为有机废料的废弃量。根据 1993 年生效的废料管理技术规则,在 12 年内将逐步禁止废弃有机物含量超过 5%的废料。因此,欧洲许多国家都开展了如何回收利用刨花板的研究,许多专家考虑热利用,但仍存在形成有毒物质的问题。

许多研究所研究了分解刨花板和纤维板作为部分或全部的原料制造刨花板和纤维板。结果表明,采用常规刨花板制造技术可以回收制品为原料制造脲醛和酚醛胶刨花板。板的性能符合通用刨花板标准的要求,而且其甲醛释放量较常规板低。

5 生物能源

在美国,木材生物量对于能源的贡献率很小,对于化学利用贡献率则更小。例如,1992 年,木材生物量能源的消费为 2.2EJ,仅占总使用能源 89.9EJ 的 2.6%。美国森林活立木蓄积量已经连续增长了 50 多年,如果保持林木用途方式不变,其蓄积量还会继续增加,随着林业的集约经营和将田地及牧地变为林地面积的增加,可用作能源生产和化工利用的森林生物量将会有巨大的增加,由于木材生物量的消费量增加有限,估计到 2010 年和 2040 年之前其消费量分别为 3.4EJ 和 3.9EJ。Howard N. Rosen 和 Kenneth E. Skog 的文章建议在一些地区扩大木材作为能源的使用,包括用于发电、交通燃料如乙醇和从石油中提炼的特种化学品^[13]。

在新西兰,木材作为能源材料与其它能源材料相比所占比例非常低(从1974到1993年,仅占能源供应的约5%~7%)。国外引种树木的大量采伐使这些森林成为生物量能源,即原木生产及锯材生产的剩余物在能源生产方面有巨大潜力,同时短周期人工林也可直接成为生物量能源的原料。该工程运用了一个系统,试图在经济利用上估算新西兰、中北部岛屿(CNI)辐射松作为生物量能源的可能性。该地区岛屿的大量森林产生的大量原木及锯材剩余物为其在利用上提供了可能性。

“两阶段处理”被用于估计生产成本。首先,为了从标准水平上推断或估计现有国有林和非工业用材林作为能源材料的可能性,用生物量生长模型模拟生物量的生长。其次,用林业财产模型模拟CNI地区资源20年间几种不同情况下的生物量产量,每种情况假定最大目标值和非下降生物量产量。最基本的情况由对现行采伐操作作了少量调整的生物量恢复及利用选择项组成。灵敏度分析证明,这些变量通过对剩余物回收利用费用的影响,从而大大影响到生物量的运输费用,如生物量产量、设备折旧,运输费用及林木尺寸大小^[14]。

巴西作为发展中国家的一员,薪炭材在整个巴西能源供应方面起着重要作用。巴西1992年薪材的消耗量为 $230 \times 10^6 \text{ m}^3$,相当于各种能源消耗量的13.3%。薪材的消耗量大于工业中对木材的利用。

在巴西,将国家森林中的木材作为能源使用非常普遍,尤其是在农牧区。然而,南部、东南部及东北部的森林已近枯竭。

从1966年到1986年,巴西政府制订了发展速生人工林的政策,种植了500万公顷的人工林,主要为松树及桉树。这对制浆及造纸工业的迅速发展产生了积极的影响,同时,有力地支持了木炭作为燃料的炼钢业,但对巴西薪材的贡献并不大。

乱砍滥伐及缺乏具体营林计划已使巴西的薪材供应紧缺。为了使将来的薪材利用增加,应该采取措施解决以上问题。通过提高薪材热利用率技术和综合利用森林及工业剩余物的办法减少对薪材的需求量,同时,全面利用林产品新技术显得非常必要。事实上,巴西在能源供应方面具有良好的条件,制订林业发展政策,这将有损于恢复环境、减少大气中的二氧化碳。

6 参考文献

1 Nobuaki Hattori, Shigeru Kitayama, Keisuke Ando and

- Yuji Imamura. Laser Incising of Wood—Its Feasibility to Make High—Durable Lumber // IUFRO XX World Congress Proceeding, Division 5, 1995, 362
- 2 Markus Hecker and Gero Becker. Surface Roughness of Douglas Fir Veneer as a Result of Silviculture Management // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 352
- 3 Udo Hans Sauter. Variation of Technological Wood Properties of Douglas Fir as an Expression of Different Growth Conditions // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 353
- 4 L. Wallström. Wood Surface Stabilization, Cell Wall Bulking // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 172
- 5 T. K. Dhamodaran. Chemical Modification of Rubberwood by Acetylation and its Effect on Dimensional Stability and Physical and Mechanical Properties // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 382
- 6 Cristina Timar and Daniela mihai. Researches Concerning the Chemical Modification of Aspen Wood // IUFRO XX World congress Proc. , D. 5, 1995, 177
- 7 Jovan Miljkovic, Milanka Djiporovic and Petar Todorovic. The Forecast of Wettability via Infrared Absorptions of Acetylated Wood Particles // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 172
- 8 Alexander Elbert, Irina Gamova and Sergiy Kamenkov. Medium Density Wood-based Panels without Resin // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 371
- 9 Chia-Ming Chen. States of the Art Report: Adhesives from Renewable Resources // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 365
- 10 Bunichiro Tomita. Recent Progresses in the Characterization of Wood Adhesives // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 367
- 11 Terry Sellers, Jr. and Robert A. Haupt. New Developments in Adhesives and Gluing in North America // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 366
- 12 Hiroaki Yoshida and Chung-Yun Hse. An Overview of Wood Adhesives Products and Demand for Them in Asia // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 368
- 13 Howard N. Rosen and Kenneth E. Skog. United States Wood Biomass for Energy and Chemicals; Possible Changes in Supply, End Uses, and Environmental Impacts // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 389
- 14 Bruce p. Glass and James H. Mercer. Economic Availability of Forest Biomass for Energy Production // IUFRO XX World Congress Proc. , D. 5, 1995, 388