



Лес как будущее Финляндии¹

С. Лемоник

Густые леса из сосны, ели и березы покрывают $\frac{3}{4}$ территории Финляндии, одной из самых лесистых стран Европы. Соответственно, нет ничего удивительного в том, что бумага и другая продукция лесного сектора являются основой экономики Финляндии. А вот что по настоящему удивительно — сегодня лишь 20 % объема экспорта Финляндии составляет лесная продукция, тогда как этот показатель в начале XX века составлял 80 %.

Мир меняется. Бумажные газеты уходят в прошлое, унося с собой потребность в бумаге. Дерево в строительстве заменяют металлы и композитные материалы. Даже рост интернет-торговли и связанный с этим бум производства упаковочного картона не могут остановить снижение спроса. И речь идет о секторе, который непрерывно рос на протяжении 100 лет, а начиная с 2000 года вышел на плато.

Это могло бы означать катастрофу для Финляндии. Но лесная нация заметила грозные предзнаменования задолго до этого. В конце 1990-х представители промышленности, науки и органов государственной власти и управления много раз собирались, чтобы разработать план. Финляндия уже зарекомендовала себя страной, открытой новым технологиям: стоит вспомнить крупнейший успех — Nokia. Финский промышленный гигант, который, кстати, начинал с производства бумаги, отставил на второе место производство шин, компьютеров и другой продукции и сосредоточился на производстве мобильных телефонов, и это решение сделало Nokia словом, известным в каждой семье по всему миру. Может быть, думали лидеры Финляндии, лесная промышленность тоже способна к крутому повороту. И, возможно, ключевую роль в этом повороте способны сыграть наука и технологии.

В прошлом году одно из направлений плана, подготовленного в ходе этих встреч, принесло плоды. В Университете Аалто, расположенном в пригороде Хельсинки, открылась кафедра биопродукции и биосистем, которую ученые, на ней работающие, называют Bio².

Новая кафедра возникла в результате присоединения к факультету технологии лесной продукции подразделений, занимающихся биохимией и биотехнологией. Герберт Сикста, руководитель направления, поясняет, что объединение призвано помочь ученым совместно разрабатывать инновационные подходы, связанные с древесиной и химией древесины.

Основная задача Bio² — разработка новых и более совершенных способов использования древесины — не сильно отличается от деятельности, которую ранее вела лаборатория технологии лесной продукции. Сикста говорит, что «тем не менее, инструментарий, которым мы сейчас располагаем, не ограничивается инженерией и химией. Теперь он расширен за счет биотехнологии и биохимии».

После преобразования факультет занимается не только бумагой. Собственная научная деятельность Сиксты связана с производством тканей из древесного волокна. Его коллеги используют древесину для производства нанокристаллов и наночастиц, которые применяются в медицине, катализе и фильтрах. Ученые стараются вдохнуть в лесной сектор новую жизнь.

Исследователи из Университета Аалто уверены в том, что прорывные научные идеи вдохнут новую жизнь в отрасль, являющуюся одним из традиционных локомотивов экономики Финляндии.

© Фотобанк Shutterstock



Более 230 000 км² Финляндии покрыто лесом, и эта площадь увеличивается каждый год

«Университет Аалто занимает лидирующие позиции в этой сфере как в Финляндии, так и во всей Европе. Они добились впечатляющих успехов», — говорит Мика Аалто, руководитель департамента по поддержке предпринимательства и инноваций Министерства занятости и экономики Финляндии (Аалто — широко распространенная в Финляндии фамилия).

Создание Bio² отражает более значимые изменения, происходящие в Финляндии. Университету Аалто еще нет и 10 лет, он был основан в 2010 году при слиянии Хельсинского университета технологии, Хельсинской школы экономики и Университета искусств и дизайна Хельсинки, причем каждому из этих научно-образовательных учреждений было более 100 лет.

Названный в честь, наверное, самого известного из сыновей Финляндии архитектора Алвара Аалто, этот юный университет стал одним из центров перехода страны к высокотехнологичной экономике. Microsoft, Nokia и другие компании создали подразделения на территории университетского городка, ранее бывшего олимпийской деревней Летних Олимпийских игр 1952 года, или обосновались неподалеку.

Привлечение зарубежных корпораций, ученых и финансирования является важной целью университета. Как и лесной сектор, университет ищет путь позитивных изменений в новом веке.

Чтобы обеспечить реализацию этих планов, правительство Финляндии стимулирует научный обмен и обеспечивает финансирование университетов и государственных научно-исследовательских организаций, в том числе с использованием финансирования корпораций. На вебсайте Bio² можно обнаружить логотипы десятков партнеров из бизнес-сектора. Одним из таких партнеров является компания Metsä Fibre, занимающаяся производством целлюлозы и другой продукции из древесины. «Думаю, что для такой маленькой страны, как Финляндия, одним из ключей к успеху является тесное

¹ Опубликовано в журнале Chemical and Engineering News (т. 96, вып. 7 за 2018 год, <https://cen.acs.org/articles/96/i7/Looking-Finlands-future-forests.html>). Перевод с англ. Н. Шматкова (FSC России) и А. Беляковой, подготовлен в рамках реализации проекта «Партнерство WWF — IKEA по лесам». Редакция благодарит М. Карпачевского (FSC России) за идею публикации статьи на русском языке.



сотрудничество», — говорит Никлас фон Веймарн, вице-президент Metsä, которая активно сотрудничает с Аалто и другими университетами в научно-исследовательской сфере, что необходимо для производства инновационной продукции.

Чтобы понять, что происходит в Финляндии, для начала нужно понять древесину. В древесине имеются два основных компонента — целлюлоза и лигнин.

«Когда мы смотрим на древесину и кору, на самом деле мы видим прекрасные молекулы, созданные природой», — говорит Тимо Хейкка, вице-президент по научно-исследовательской деятельности Stora Enso, финской целлюлозно-бумажной компании.

Целлюлоза — это линейный полисахарид из молекул D-глюкозы, которые составляют примерно половину древесины (по массе). Это самый длинный известный природный полимер, и именно он придает древесине прочность на разрыв, которая определяется усилием, необходимым для разрыва древесины при растягивании.

Лигнин — это молекулы, обеспечивающие прочность древесины на сжатие, что определяется усилием, при котором древесина начинает разрушаться при сдавливании. От 1/5 до 1/3 сухой массы древесины составляет лигнин. В химическом отношении это смесь родственных ароматических полимеров.

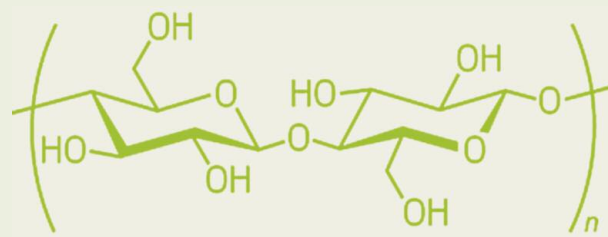
Остальная часть древесины — это разветвленный полисахарид, который называется гемицеллюлоза, пока практически не используемый промышленностью. Первым этапом переработки древесины является отделение целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы. Срубленные деревья измельчают в щепу. Затем щепу варят в щелочном растворе каустической соды и сульфида натрия или в растворе серной кислоты: оба метода позволяют расщепить и растворить лигнин и гемицеллюлозу с получением черной массы. Остаток представляет собой главным образом целлюлозу, которую раскатывают и сушат, получая бумагу.

Обычно на ЦБК эту черную массу (смесь гидрокарбонатов), называемую черным шелоком, используют как топливо для бойлеров или энергогенераторов.

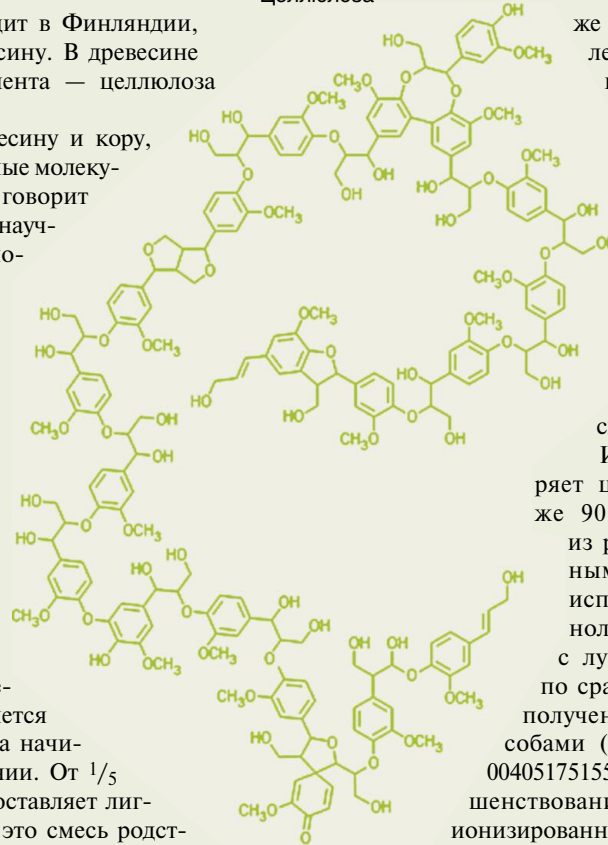
В основе происходящих сейчас в Финляндии перемен лежит понимание того, что, учитывая структурную сложность и свойства молекул, образующих древесину, ученые могут пойти гораздо дальше, чем получение черного шелока и целлюлозы.

Возьмем, к примеру, лабораторию Сиксты по производству тканей. Производство тканей из древесины — далеко не новая идея. Еще в 1880-х годах французский ученый Илер де Шардоне при экструдировании целлюлозной смеси получил искусственный шелк, или вискозу.

Получение вискозы из древесной целлюлозы длительное время было важной отраслью лесоперерабатывающей промышленности Финляндии, но последний завод по производ-



Целлюлоза



Лигнин

У лигнина нет определенной химической структуры. На рисунке приведен пример структуры одной из молекул

этого материала закрылся в 1990-х. Это было морально устаревшее, малоэффективное и экологически грязное производство. «Тем не менее, спрос растет, поскольку растет население, и качество жизни в среднем увеличивается», — говорит фон Веймарн. «Так где же источник волокон? Именно в этом лесная промышленность разглядела новую возможность».

Сикста придумал более энергоэффективный способ производства: он использовал для растворения целлюлозы ионизированный раствор, из которого затем выделяют волокна вискозы. Он экспериментировал с 1,5-диазабицикло [4.3.0] нон-5-ен ацетатом, синтезированным Илка Килпейненем в Университете Хельсинки.

Ионизированная жидкость растворяет целлюлозу при температурах ниже 90 °С. Ученым удалось получить из раствора волокна. Согласно научным исследованиям в результате использования так называемой технологии лиоцелл образуются волокна с лучшими физическими свойствами по сравнению с волокнами целлюлозы, полученными другими известными способами (*Textile Res. J.* 2015, DOI: 10.1177/0040517515591774). Сикста работает над совершенствованием вторичного использования ионизированного раствора, что позволит сделать производство еще более экологичным.

Ученые Университета Аалто продемонстрировали новые волокна на модном показе в 2014 году, где были впервые представлены платья от финской дизайнерской компании Marimekko. Сейчас несколько компаний, включая Metsä Fibre, сотрудничают с Сикстой над коммерциализацией технологии лиоцелл.

«Это очень хороший пример того, как научное сообщество идентифицирует возможность, а компании коммерциализуют ее», — говорит фон Веймарн. Использование целлюлозы для изготовления волокна — это вполне естественный, но не единственный вариант. Химик-инженер Университета Аалто Орландо Рояс работает с целлюлозой в другой форме — с нанокристаллами и нанофибриллами.

В деревьях и других растениях полимерные нити целлюлозы сплетены в фибриллы, которые в свою очередь сплетены в более толстые пучки, представляющие собой собственно целлюлозное волокно. В фибриллах имеются плотные кристаллические участки, перемежающиеся с более аморфными участками.

При обработке кислотами эти аморфные участки растворяются, и становится возможным выделить мельчайшие плотные палочковидные частицы — нанокристаллы целлюлозы. Рояс обнаружил несколько возможностей использования этих нанокристаллов, которые относят к широкому классу веществ, называемому наноцеллюлозой. При добавлении воды возникают связи, приводящие к образованию вязкого гидрогеля. Рояс является обладателем патента



на технологию, повышающую вязкость жидкостей, используемых при бурении, что позволяет улучшить их смазывающие и теплоизоляционные свойства. Эта технология сейчас применяется нефтедобывающей компанией Halliburton.

Это, пожалуй, наиболее примитивное применение древесных частиц. Поскольку целлюлоза полностью состоит из D-глюкозы, эти нанокристаллы хиральны. Это позволяет применять их в качестве фильтра, в том числе для отделения энантиомерных составляющих. Коллега Рояса Марк Маклахлан, работающий в Университете Британской Колумбии, продемонстрировал возможность использования нанокристаллов целлюлозы в качестве основного компонента подобных фильтров, они позволяют получить хиральные поры в силиконовых пленках (*Nature* 2010, DOI: 10.1038/nature09540).

Нанокристаллы целлюлозы также могут использоваться для окрашивания материалов. Крылья некоторых бабочек и панцирей жуков мерцают и переливаются благодаря нанокристаллам. У насекомых свет отражается и преломляется нанокристаллами хитина, но нанокристаллы целлюлозы обладают такими же свойствами.

Их хиральность обуславливает способность мельчайших палочковидных частиц со спиральной скрученностью менять длину волн отраженного света и создавать различные оттенки. Рояс обнаружил, что чем более глубокому гидролизу подвергалась целлюлоза, тем меньше размер нанокристаллов и тем правильнее их форма, соответственно, тем меньше длина волны отраженного света в спектре от голубого до белого (*Small* 2017, DOI: 10.1002/smll.201702084).

Тема использования целлюлозы — это не единственное, что связывает Рояса и Сиксту. Они оба приехали в Финляндию из-за рубежа. Рояс родился в Венесуэле и перешел в проект Bio² из Университета Северной Каролины, а Сикста переехал из Австрии. Теперь они вместе работают на одном факультете в Университете Аалто. По словам декана факультета Янне Лейна, из первоначального состава кафедры технологии лесной продукции осталось только двое сотрудников.

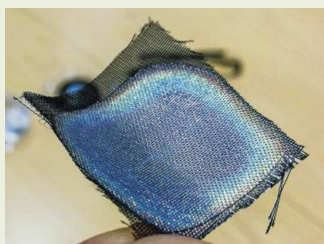
Стремление к модернизации лесоперерабатывающей промышленности Финляндии совпало с реформированием Университета Аалто по более западной модели. Сикста гордится, что около 65 % объема финансирования кафедры — около 7,8 млн долл. США — поступает из внешних источников в виде грантов, распределяемых на конкурсной основе. Основной источник грантов — Европейский Союз.

Лигнин обычно играл вторую скрипку рядом с целлюлозой. 95 % лигнина, экстрагируемого из древесного и иного растительного сырья, сжигается для получения электроэнергии. Лигнин более сложно перерабатывать, тогда как целлюлоза представляет собой гомогенное вещество с линейной структурой молекул. «Структура лигнина еще до конца не изучена», — говорит Моника Остерберг, химик Bio². Но эта сложность представляет для Остерберг большой интерес. Она обнаружила способ получения наночастиц лигнина и изменения их свойств, что позволяет использовать их в различных хозяйственных целях.

Получение наночастиц оказалось не очень сложным. Раствор лигнина в тетрагидрофуране добавляют в воду, при этом наблюдается самообразование глобул из частиц лигнина, которые и представляют собой наночастицы. Это происходит за счет того, что гидрофильные части молекул лигнина ориентируются к воде.

Остерберг была очень удивлена, что это так просто. Ее предшественники для получения наночастиц пытались обрабатывать лигнин ультразвуком. Другие обрабатывали лигнин ацетилбромидом, а это довольно опасное

© О. Роджас



Образцы тканей с радужными цветами, создаваемыми нанокристаллами целлюлозы

для использования вещества. Результаты этих экспериментов во многом зависели от способа получения лигнина и породы.

Лигнин обладает многими очень полезными свойствами, исследованием которых занимаются ученые Университета Аалто. Благодаря высокому содержанию ароматических компонентов лигнин активно поглощает фотоны ультрафиолета, что делает возможным его применение в форме наночастиц, например, в солнцезащитных кремах. Кроме того, Остерберг вместе с коллегами из Университета Аалто

и Национального института здравоохранения и социального обеспечения обнаружили, что высушенный и измельченный лигнин эффективен в борьбе с устойчивыми штаммами *Staphylococcus aureus*, что объясняется, скорее всего, наличием в этом полимере гуацильных, карбоксильных и некоторых других групп (*BioResources* 2017, DOI: 10.15376/biores.12.4.7601-7614).

Коллега Остерберг по Университету Аалто Маури Костийнен также занимается наночастицами лигнина. Он надеется получить средство для борьбы с раком.

Специалисты связывают будущие успехи в синтезе лекарств с наночастицами, тем не менее сейчас в качестве сырья для получения наночастиц используется нефть и газ. Костийнен и Остерберг считают, что лигнин представляет собой устойчивый и возобновляемый альтернативный источник.

Костийнен в сотрудничестве с физхимиком Хельдером А. Сантосом из Университета Хельсинки получил карбоксилат лигнина. Из него по методу Остерберг получают наночастицы. Карбоксильные группы позволяют ученым насыщать наночастицы лигнина белками, способными проникать через клеточные мембраны, что обеспечивает проникновение наночастиц в клетки опухоли. К наночастицам добавляют бензазулен, который в других условиях малорастворим и усваивается с трудом, но с наночастицами легко проникает в клетки опухоли и уничтожает их, не повреждая здоровые, исследования проводились на культурах тканей (*Nanomedicine* 2017, DOI: 10.2217/nnm-2017-0219).

Ученым еще предстоит открыть многие другие удивительные свойства древесины. Исследователи Университета Аалто обсуждают возможность получения угольных нитей, усиленных целлюлозой и лигнином. Они предсказывают возможность появления гибких прозрачных пленок для производства экранов или полимеров-электропроводников на основе древесины для использования в электронике.

Невозможно точно выяснить, когда человек впервые начал использовать древесину, но можно с достоверностью утверждать, что это произошло на самой заре человечества. Кстати, известно, что шимпанзе используют палки в качестве орудий. Старейший из письменных источников человечества описывает, как царь Гильгамеш в третьем тысячелетии до нашей эры срубил лес, чтобы построить плот.

Сейчас другая эпоха, весьма отличная от той, которая была лишь несколько веков назад. Мы используем новые материалы — пластик, композиты на основе углеводов и сплавы, совершенно неведомые нашим предкам. Но, по крайней мере, в Финляндии люди широко используют леса и древесину. Так было, так есть и так будет.

Статья переведена и воспроизведена с разрешения *Chemical & Engineering News* (© 2020 American Chemical Society). Статья впервые была опубликована 6 февраля 2018 г.

https://cen.acs.org/articles/96/i7/Looking-Finlands-future-forests.html?utm_source=wwfru&utm_medium=Partner&utm_campaign=CEN

