

Биотехнологии для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажной промышленности (современное состояние)

С.А. Медведева, профессор, д-р хим. наук

С.С. Тимофеева, зав. кафедрой, д-р техн. наук, профессор

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет

e-mail: sstimofeeva@mail.ru, jrsam@mail.ru

Ключевые слова:

целлюлозно-бумажная промышленность, экологическая безопасность, биотехнологии, биоапаллинг, биологическая отбелка, нанобиотехнологии.

На основании концепции развития целлюлозно-бумажной промышленности России на период до 2015 г. определены возможные направления посткризисного развития отрасли, современные тенденции ее индустрии. Одним из направлений оптимального пути достижения экологического и ресурсосберегающего эффекта считается внедрение наилучших доступных технологий. В статье дана оценка научного потенциала отечественных разработок некоторых наилучших современных биотехнологий, способных создать новые концептуальные основы развития технологий в целлюлозно-бумажной промышленности и повысить экологическую безопасность производства.

1. Введение в проблему

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) является одной из стратегических и социально значимых отраслей экономики России. Значительной проблемой ЦБП являются сбросы сточных вод, выбросы в атмосферу и высокое энергопотребление. Совершенствование отдельных звеньев технологических процессов на предприятиях ЦБП позволило превзойти проектную производительность и обеспечить эффективность производства при огромных платежах за негативное воздействие на окружающую среду. Однако сама концепция технологического производства целлюлозы, основанная на технических возможностях середины XX века, в настоящее время является барьером для дальнейшего снижения экологической нагрузки на окружающую среду и сдерживает повышение эффективности производства. Современные нормативные правовые акты, стандарты, правила требуют перехода на наилучшие доступные технологии (НДТ). Согласно директиве Евросоюза, НДТ — это наиболее эффективные и передовые стадии в развитии производственной деятельности и методов эксплуатации объектов, которые указывают на практическую пригодность определенных технологий в целях создания основы для определения предельных величин выбросов, предна-

значенных для предотвращения или, если это практически невозможно, сокращения выбросов и воздействия на окружающую среду в целом [1].

В настоящей работе проанализировано современное состояние ЦБП и рассмотрены научные основы наилучших биотехнологий, которые с точки зрения авторов, можно использовать при совершенствовании технологий целлюлозно-бумажной промышленности, обеспечив экологическую безопасность производства.

2. Целлюлозно-бумажная промышленность России

Жизненно необходимая продукция ЦБП сегодня — это десятки наименований полуфабрикатов, сотни — бумаги, картона и изделий из них. Это различные виды целлюлозы для химической, легкой и оборонной промышленности, бумага для печати и письма, тароупаковочные виды бумаги и картона, большая номенклатура технических видов бумаги и картона, бумажно-беловые и санитарно-гигиенические изделия, обои и др.

Важным фактором увеличения конкурентоспособности продукции ЦБП является стабильно растущий спрос внутреннего и мирового рынка на продукцию отрасли. Например, в странах Азии он достигает 5% в год, в России — 6%. В настоящее время товарная российская целлюлоза поставляется в 40 стран мира, та-

роупаковочные материалы — в 75, а бумага — в 70 государств. Основными видами экспортной продукции являются товарная целлюлоза, бумага и картон массовых сортов. В 2009 г. целлюлозно-бумажной продукции экспортировано на сумму 2223 млн долл. [2].

Однако специалисты констатируют, что достаточно большой перечень целлюлозно-бумажной продукции российского производства значительно уступает зарубежным аналогам. Отдельные виды ассортимента (мелованная высококачественная бумага, сигаретная, санитарно-гигиеническая, бумага для упаковки пищевых продуктов, для слоистых пластиков и т.д.) из-за нехватки производственных мощностей закупается по импорту. Начиная с 2005 г. темп роста импорта в 2 раза превышал темп роста экспорта, и в 2009 г. впервые в истории отечественной целлюлозно-бумажной промышленности сложилось отрицательное сальдо внешнеэкономического баланса по всей номенклатуре целлюлозно-бумажной продукции. Оказалось, что темпы роста импорта почти вдвое опережают темпы роста экспорта [2].

На сегодня, к сожалению, наша самая богатая лесом страна (81,9 млрд м³) производит лишь около 2% от мирового объема лесопромышленной продукции и на процессы формирования мирового рынка существенного влияния не оказывает. Все крупные целлюлозные заводы строятся в последние годы в лесозыбыточных районах мира с дешевой рабочей силой (Бразилия, Аргентина, Индонезия), а перерабатывающие мощности размещаются в зонах повышенного спроса (Восточная Европа, Китай и другие страны Азии). За последние 25 лет в России не построено ни одного нового целлюлозно-бумажного предприятия. Однако в последнее время активно прорабатываются с фирмами Китая, Финляндии и других стран предложения по созданию новых заводов по производству товарной целлюлозы на территории Читинской области, Красноярского края, Республики Коми [3].

Сегодня в России работают около 40 производителей целлюлозы. Большинство предприятий входит в состав лесопромышленных холдингов. Рынок целлюлозы в значительной мере консолидирован — семь крупнейших предприятий обеспечивают около 70% объема ее производства. К числу самых динамично развивающихся компаний отрасли относятся «Монди Сыктывкарский ЛПК» и «Группа «Илим», Котласский и Архангельский целлюлозно-бумажные комбинаты (ЦБК). Многие предприятия либо целиком, либо частично принадлежат иностранным компаниям. В частности, мировой лидер целлюлозно-бумажной отрасли — американская корпорация «International Paper» приобрела половину бизнеса компании «Илим Палп», которая контролирует четыре крупнейших российских целлюлозно-бумажных комбината: Кот-

ласский ЦБК, Братский ЦБК, Усть-Илимский ЛПК и Санкт-Петербургский КПК [4].

Одной из специфических особенностей ЦБП России, влияющих на ее развитие, размещение, производственную структуру, является положение отрасли в лесопромышленном комплексе страны. Отсутствие инфраструктуры, транспортная недоступность лесных ресурсов осложняют их использование. Располагаемая почти четвертью мировых запасов сырья, лесопромышленный комплекс России занимает неоправданно скромное место в экономике страны: в объеме промышленного производства — 3,1%, в валовом внутреннем продукте — 0,9%, в валовой выручке от экспорта — 3,0%, в объеме мировой торговли — 2,2% [2].

Организация деятельности лесопромышленного комплекса далека от принципов рационального природопользования. Так, имеют место большие потери древесного сырья на лесозаготовках, в процессе транспортировки и первичной переработки леса на нижних складах. Они составляют до 30% объема заготавливаемой древесины. К тому же большая часть заготавливаемой древесины вывозится за рубеж. Для сравнения: в Финляндии и Швеции вывозят в основном продукцию из древесины, подвергнутой глубокой химической переработке (соответственно 60 и 70%). Объем заготовок в этих странах в два с лишним раза меньше, чем в России, а валютная выручка от экспорта в 2,5 раза больше. Финляндия, располагая 0,5% лесных ресурсов планеты, дает 25% мирового экспорта целлюлозно-бумажной продукции, в то время как Россия, располагая 21% мировых запасов леса, дает менее 1% экспорта этой продукции. Кроме того, современная отечественная ЦБП характеризуется значительным количеством предприятий небольшой мощности, оснащенных устаревшим оборудованием. На многих предприятиях используются энергоемкие и экологически устаревшие технологии с высоким потреблением сырья, энергоресурсов, химикатов и воды [5].

Целлюлозно-бумажная промышленность в Сибирском регионе

В Сибирском регионе ЦБП является одной из ведущих отраслей промышленности. Восточно-Сибирский экономический район производит 16,7% всего картона России, причем Иркутская область дает 7,3%. Здесь работают Братский и Усть-Илимский лесопромышленные комплексы, Байкальский ЦБК (Иркутская область), Селенгинский ЦБК (Республика Бурятия), Красноярский ЦБК (Красноярский край). В экономике Иркутской области лесопромышленный комплекс занимает одно из ведущих мест. Этому способствует то, что Иркутская область располагает уникальными лесными ресурсами. По данным государственного лесного реестра на начало 2010 г.,

покрытые лесной растительностью земли занимают 64,3 млн га, что составляет 83% территории области. По этому показателю регион относится к числу наиболее многолесных среди субъектов Российской Федерации. Здесь сосредоточено 12% запасов древесины спелых лесов страны, а доля особо ценных хвойных пород, таких как сосна и кедр, значительна даже в масштабах планеты. Никакая другая область, край или республика страны не может похвастаться таким богатством [6].

Необходимо отметить, что целлюлозно-бумажная промышленность — наиболее сложная отрасль лесного комплекса, связанная с механической обработкой и химической переработкой древесины. Эта отрасль отличается:

- высокой материалоемкостью: для получения 1 т целлюлозы необходимо в среднем 5—6 куб. м древесины;
- большой водоемкостью: на 1 т целлюлозы расходуется в среднем 350 куб. м воды;
- значительной энергоемкостью: 1 т продукции требует в среднем 2000 кВт·ч.

Использование при переработке древесины значительных объемов воды, химикатов, различных видов топлива делает неизбежным образование газовых выбросов и загрязненных сточных вод, объем которых трудно контролировать. По сбросу со сточными водами загрязнений целлюлозно-бумажная промышленность находится на третьем месте среди обрабатывающих производств (6,6%). К тому же большие удельные затраты энергоресурсов на выпуск продуктов требуют постоянного внимания к решению проблем очистки дымовых газов, утилизации твердых отходов, золы, коры, шламов. Целлюлозно-бумажная отрасль признана во всем мире одной из приоритетных по воздействию на окружающую среду и здоровье человека. Поэтому постоянная забота отрасли — повышение экологической безопасности [2].

3. Концепция развития целлюлозно-бумажной промышленности России

В настоящее время ведущими разработчиками РАО «БУМПРОМ» совместно с ЗАО «ГИПРОБУМ» разработана концепция развития ЦБП России на период до 2015 г. [7], в которой определено, что магистральными направлениями российской ЦБП в рассматриваемом среднесрочном периоде (2007—2015 гг.) останутся расширение и реконструкция действующих предприятий с максимальной экологизацией производства, внедрением наилучших доступных технологий и созданием импортозамещающих производств. Наиболее приближенные к реализации на ближайший период времени технологии и их нормативы представлены в работах [8, 9]. Од-

нако перечнем этих технологий не могут быть ограничены возможности модернизации производства. С нашей точки зрения, в последних обзорах наилучших доступных технологий незаслуженно мало внимания уделяется биотехнологиям, тогда как именно биотехнологии рассматриваются как наиболее перспективные технологии XXI века.

Учитывая, что стратегической задачей модернизации ЦБП является создание инновационных проектов глубокой и комплексной переработки лесных ресурсов, рассмотрим биотехнологии, в том числе и разработки авторов, перспективные для применения в ЦБП как экологически надежные, экономически целесообразные и достижимые, оценив их научно-технический потенциал и российский опыт.

4. Биотехнологии в целлюлозно-бумажной промышленности

Биотехнологии варки и отбелки целлюлозы. Это формирование нового подхода к основным технологическим процессам варки и отбелки целлюлозы, связанного с использованием микроорганизмов — лигнинразрушающих грибов и их ферментных систем.

Биопаллинг в ЦБП. Процесс предварительной обработки древесной щепы лигнинразрушающими грибами (делигнификаторами) с целью получения конечного продукта, обогащенного целлюлозой, получил название «биопаллинг» (*pulping* — варка).

В разработке этого направления первоочередным является выбор лигнинолитической культуры избирательного действия: она должна преимущественно разрушать лигнин, мало затрагивая целлюлозу.

Целенаправленному изучению этой проблемы положил начало обзор американских исследователей о лигнинолитических культурах и их перспективах, вышедший в 1957 г. [10]. Позднее, в 1971 г. был получен первый патент, описывающий получение древесной массы, обогащенной целлюлозой с помощью выбранного лигнинразрушающего гриба [11].

В настоящее время разработки технологий биоделигнификации для ЦБП активно ведутся за рубежом (Финляндия, Швеция, США, Япония, Канада). Проводятся ежегодные международные симпозиумы (Int. Symp. Wood and Pulp. Chem.). Многочисленные теоретические и прикладные исследования, свидетельствующие о принципиальной возможности использования грибов как делигнификаторов в технологических процессах переработки древесины, обобщены в ряде работ, например [10, 12, 13].

В России долгое время ведущей организацией по изучению природных особенностей грибов-биоделигнификаторов оставалась Ленинградская ЛТА им. С.М. Кирова (в настоящее время Санкт-Петербургская государственная лесотехническая

академия им. С.М. Кирова — СПбГЛТА). В ЛТА целенаправленно проводились поиски штаммов грибов, обладающих высокой лигнинолитической активностью, например [14]. В результате многолетней работы широкомасштабного отбора штаммов был выбран наиболее эффективный биоделигнификатор — гриб *Phanerochaete sanguinea* (Fr) [15], обладающий рядом преимуществ по сравнению с культурой *Ceriporiopsis subvermispora*, разрабатываемой за рубежом [16].

В Восточной Сибири, где сосредоточена основная масса целлюлозно-бумажных предприятий, на протяжении многих лет в Иркутском институте органической химии им. А.Е. Фаворского СО РАН (сегодня институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН — ИрИХ СО РАН) проводились исследования по разработке научных основ биоделигнификации лигноцеллюлозных субстратов грибом *Phanerochaete sanguinea* (Fr) [17, 18]. Авторами настоящей статьи с сотрудниками были установлены биохимические механизмы делигнификации и созданы теоретические предпосылки для разработки новых экологически безопасных технологий: биологической варки и биологической отбелки. Детально изучены процессы делигнификации лиственной древесной щепы грибом *Phanerochaete sanguinea* и его культуральными фильтратами перед водно-этанольной варкой и наглядно показаны преимущества биотехнологической обработки и перспективы включения этой стадии в технологический процесс варки. Полученная древесная масса отличалась высоким выходом и улучшенными физико-химическими свойствами [19].

Внедрение технологии биоалпинга сталкивается с рядом серьезных проблем и, прежде всего, с проблемами масштабирования, контроля за параметрами процесса, сокращения времени делигнификации, длительного сохранения стерильности и др. В связи с этим она до настоящего времени не реализована в промышленном масштабе. Однако возможность уменьшить объемы затрат химикатов и энергии, повысить в итоге качество и выход получаемых волокнистых полуфабрикатов, сократить выброс и сброс загрязняющих веществ позволяет рассматривать данную технологию как перспективную и в будущем экономически выгодную.

За рубежом разработкой этого направления занимаются многие научно-исследовательские институты при активной поддержке заинтересованных целлюлозно-бумажных компаний. Технология уже получила инженерное воплощение [20]. Разработана система обработки технологической щепы перед варкой, основанная на использовании двух ленточных конвейеров, на одном из которых осуществляется стерилизация щепы, а на другом микробиологическая инокуляция. Процесс делигнификации происходит в течение двух недель уже в буртах. Важно, что мас-

штабирование этого процесса (50 т древесной щепы) показало хорошую воспроизводимость результатов, доказывая возможность использования биоалпинга в промышленных масштабах.

Сегодня биоалпинг отнесен к современным инновационным технологиям и, надо полагать, благодаря в основном зарубежным исследованиям он в качестве начальной стадии технологического процесса целлюлозно-бумажного производства может стать реальностью.

Биологическая отбелка. Традиционные способы отбелки в технологической схеме получения беленой целлюлозы, связанные с использованием хлора и его соединений, являются экологически опасными. Поэтому наряду с усовершенствованием существующих схем отбелки постоянно идет поиск и разработка способов с использованием новых экологически безопасных реагентов, позволяющих снизить расход хлорсодержащих соединений или полностью исключить их. Одним из перспективных направлений является применение в отбелке целлюлозы биологических методов [21]. Значительный вклад в разработку этого направления внесли работы российских ученых.

Сотрудниками Иркутского института химии СО РАН в содружестве с СПбГЛТА, Московским государственным университетом (МГУ), Братским АО СИБ НИИ лесной и целлюлозно-бумажной промышленности были выполнены многоплановые исследования по биологической отбелке лиственных и хвойных сульфатных целлюлоз лабораторных и промышленных варок (Байкальского и Братского ЦБК) различного назначения. Доказано, что для углубления делигнификации и повышения ее селективности в процессах отбелки можно использовать как микроорганизмы (*Phanerochaete sanguinea*), так и секреторные ферменты оксидазного и гемицеллюлазного действия [22, 23].

Наиболее перспективным при отбелке является использование ферментов ксиланазного типа. Была разработана технологическая схема пероксидной (бесхлорной) отбелки лиственной сульфатной целлюлозы, предварительно подвергнутой воздействию опытных отечественных ксиланазных препаратов, которые по эффективности действия оказались на уровне коммерческих препаратов Escorulp X-200, Escorulp XM-60, Escorulp TX-200С финской фирмы Primalco LTD. При этом получены партии лиственной целлюлозы с белизной 82%, с хорошими механическими показателями [24]. Большая серия выполненных работ однозначно свидетельствует о том, что введение микробиологической (гриб *Phanerochaete sanguinea*) или ферментативной ступени с использованием отечественных ксиланазных препаратов в традиционные схемы отбелки целлюлозы позволяет:

- увеличить белизну целлюлозы на 5% ISO по сравнению с контрольными опытами, увеличив

тем самым конечную белизну целлюлозного по-
луфабриката до 82–84,5%;

- снизить расход реагентов, в частности молекулярного хлора, или полностью исключить его из технологического цикла отбелки, а следовательно, снизить или исключить загрязнение сточных вод хлорорганическими соединениями;
- сократить время варки и отбелки, т.е. снизить энергоемкость производства.

Испытания технологии бесхлорной отбелки с ферментативной стадией планировались на Братском ЦБК, но смена собственника предприятия в 1990-х гг. изменила эти планы.

Ферментные препараты для процессов отбелки в технологиях ЦБП уже активно производятся за рубежом. В настоящее время ксиланазы выпускаются в США (Genencor International), Дании (Novozymes), Финляндии (Oy Vanmark AB), Канаде (IOGEN Bio-Products) и широко используются в производстве. В нашей стране производство ксиланаз для ЦБП все еще находится на стадии лабораторных исследований и получения опытных партий. Однако на некоторых предприятиях и в России в производстве беленой сульфатной целлюлозы уже используются ферментные препараты, но пока от зарубежных производителей [25].

Эколого-экономическую значимость внедрения стадии биоотбелки можно оценить простым сравнением размера вреда, причиненного, например, виртуальным предприятием с производительностью 50 000 тонн в год беленой сульфатной целлюлозы. При переходе на биоотбелку с исключением молекулярного хлора из технологического процесса, согласно расчету [26], вред окружающей среде будет существенно сокращен по хлор-иону на 3960 тыс. руб., по хлороформу — на 11 201 тыс. руб.

Достоинства биологических методов отбелки целлюлозы — субстратная специфичность, низкие энергетические затраты, высокие выходы целевых продуктов, повышение качества целлюлозы и ее белизны, отсутствие хлорсодержащих стоков, — интегрированные в существующие технологические схемы производства ЦБП, способны поднять отрасль на принципиально новую ступень развития.

Технология получения топлива. Большое внимание уделяется разработке альтернативных существующим технологий получения топлива из отходов ЦБП. Так, по технологии шведской компании Chemrec из отработанного варочного раствора (черного щелока), а также зеленого щелока, используемого для приготовления варочного раствора при высокой температуре, в одноступенчатом реакторе можно получить синтетический газ (сингаз) с низким содержанием метана. Сингаз можно использовать во множестве процессов производства топлива и химикатов, например для газификации био-

массы. Разработан и новый вид топлива для грузовых автомобилей под названием BioDME. С 2010 г. его испытания проводят на автомашинах компании Volvo. В финском VTT-центре полученным жидким биотопливом, которое содержит меньше примесей, чем известные ископаемые виды топлива, уже предлагают заправлять топливные баки обычных автомашин [27]. Эти технологии эффективно способны решать проблему не только утилизации отработанных варочных щелоков, но и их практического использования, тем более что существенным преимуществом биотоплива является его низкая себестоимость.

Нанотехнологии в ЦБП. В отличие от вышеописанных технологий, нанотехнологии — это междисциплинарная и совсем молодая область деятельности в науке и технике. Она предполагает создание наноразмерных материалов с заданной атомной структурой (размер материалов 1–100 нм) путем контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами. Эти материалы обладают принципиально новыми, часто уникальными свойствами. Потенциальные возможности таких технологий трудно оценить. Отметим только, что создание и управление процессами самосборки систем с совершенно новыми свойствами может привести к решению глобальных вопросов человечества: проблем нехватки пищи, жилья и энергии.

Исследовательские программы по нанотехнологиям на национальном уровне запустили уже в 30 странах. Наибольшие успехи достигнуты в США, Японии, Франции. В нашей стране исследованиями в области нанотехнологий занимаются всего несколько лет, но это уже одно из приоритетных направлений науки и техники.

В целлюлозно-бумажной промышленности многие процессы частично или полностью реализуются с участием частиц или поверхностей наномасштаба. Например, среди новых областей технологий ЦБП — процесс наночистки, когда загрязненную жидкость продавливают через фильтр с размером пор 5–10 нм; это также технологии с применением ферментов для расщепления крахмалов; использование ксиланаз для интенсификации отбеливания целлюлозы, липаз для поверхностной модификации частиц вредной смолы (гидролиз глицеридов), ферментов, используемых для разрыхления структуры целлюлозных волокон с целью облегчения размола или диспергирования до нановолокон и др. [28].

Термин «наноцеллюлоза» используется для описания различных наноматериалов на основе целлюлозы. Под наноцеллюлозой (НЦ) понимается целлюлозное волокно, подверженное механическому воздействию, в результате которого получают волокно длиной до 100 нм и диаметром до 20 нм, или химическому воздействию — окислению или гидролизу — до

получения нужного числа дополнительных функциональных групп. Термин используется и для описания различных наноматериалов на основе целлюлозы. Наноцеллюлоза отличается повышенной прочностью, звукопоглощаемостью, отсутствием деформации. Целлюлозная нанопродукция стала обладать электропроводимостью, магнитными, оптическими и высокими прочностными свойствами [29].

Потенциальные области применения НЦ — производство композиционных, конструкционных и пористых материалов, бумаги и картона, покрытий, рабочих поверхностей и функциональных добавок для стабилизации коллоидов, органических красителей, для капсулирования, в том числе высокотоксичных и опасных веществ. Благодаря антибактериальным свойствам наноцеллюлоза может использоваться в биомедицине. Обсуждается возможность использования наночастиц в процессах эмульгирования, мелования бумаги и др. Предполагают, что нанотехнологии сыграют важную роль в снижении удельной ресурсоемкости технологических процессов и приведут к уменьшению расхода энергии [28, 29].

Если в технологическом процессе сочетается последовательность ферментативного и механического воздействия (как при биоопалтинге) и в результате получают нанопродукт, то такие процессы уже относят к *бионанотехнологиям*. Используя такую комбинацию, шведские ученые совместно с японскими коллегами разработали прорывную нанотехнологию, позволяющую получить очень тонкое бумажное полотно — «нанобумагу», которое прочнее стали. Сама по себе эта работа является революционной и, несомненно, окажет огромное влияние на развитие технологии производства бумаги. Из этой работы вытекает важнейший простой инженерный вывод: целлюлозные наноприфибриллы чрезвычайно прочны, поэтому особенно конкурентоспособны и перспективны для производства упаковочных и конструкционных материалов. Компанией Nano (штат Луизиана) уже внедрены и используются наноматериалы в фармацевтической отрасли для капсуляции, для микропроцессоров (изготовление нанореакторов), для микромеханического оборудования и компьютерной индустрии управления процессами [28]. Возможны революционные открытия и в

другой области бионанотехнологий — *биоинженерии*. Направленное изменение состава генома древесных растений позволит изменять свойства волокон, соотношение целлюлозы и лигнина в клеточной стенке, способность лигнина к растворению.

Нанотехнологии — исключительно наукоемкое и затратное направление, со множеством нерешенных проблем. Для исследований в этой области требуются не только новейшее дорогостоящее оборудование, но и высококвалифицированные специалисты. И все же считается, что именно инновационные решения нанотехнологий смогут фундаментально изменить деятельность отрасли.

Необходимо отметить, что развитие и внедрение новых биотехнологий в ЦБП предполагает обязательную разработку новых технологий уменьшения потребления воды и удаления отработанной воды в производстве, а также создание нового высокотехнологического оборудования.

5. Заключение

Проведенный анализ свидетельствует, что биотехнологии являются реальным направлением модернизации и экологизации ЦБП.

Программа инновационных преобразований в ЦБП особенно важна для экологической стабильности Байкальского региона, центром которого является озеро Байкал — участок мирового наследия. Для трех действующих в регионе ЦБК, как и для всей ЦБП России, в настоящее время крайне важно обратить внимание на достоинства биотехнологий и перестроить стратегию работы отрасли. В Иркутской области имеются все предпосылки для создания кластера по разработке и реализации биотехнологической переработки древесины и повышения экологической безопасности производства, а именно:

- создан и успешно работает Байкальский центр нанотехнологий;
- имеются теоретические и практические наработки по биотехнологическим процессам в научно-исследовательских институтах АН СО РАН;
- на базе Национального исследовательского Иркутского государственного университета готовят соответствующих специалистов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королева Е.Б., Жигилей О.Н. и др. Наилучшие доступные технологии: опыт и перспективы. — СПб., 2011.
2. Антропова Е.Б., Балаченкова А.П., Бусыгин М.И. и др. История ЦБП России. — Архангельск: Изд-во Правда Севера, 2010.
3. Чуйко В.А. Состояние и перспективы развития российской целлюлозно-бумажной промышленности // ЦБП России — взгляд в будущее: международный практи. конф. — URL: www.krona.edu.ru/calendar/otchet/26_10_06/2.doc
4. Текущее состояние и тенденции развития ЦБП в России 28 февраля 2011 г. / Официальный сайт РАО «БУМПРОМ». — URL: http://www.bumprom.ru/index.php?ids=290&sub_id=18335
5. Чуйко В.А. Анализ современного состояния ЦБП России. Инвестиционный климат и перспективы на буду-

- щее // Целлюлоза. Бумага. Картон. — 2000. — № 1–2. — С. 4–7.
6. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2009 году // Гос. доклад. — Иркутск: Облмашинформ, 2010.
 7. Концепция развития ЦБП России на период до 2015 года. Официальный сайт «Содружество бумажных оптовиков» (СБО). — URL: http://www.sbo-paper.ru/analytics/RussianForestry/conception_2004.
 8. Наилучшие существующие технологии в целлюлозно-бумажной промышленности: сборник. — Ч. 1, 2. — СПб., 2004.
 9. Технологические нормативы сбросов, выбросов загрязняющих веществ и количества образующихся отходов в ЦБП России на основе использования НСТ. — Ч. 1, 2. — СПб., 2004.
 10. Lawson L.R., Still C.N. The biological decomposition of lignin // Tappi J. — 1957. — Vol. 40. — P. 56A–80A.
 11. Assarsson A., Nilsson T. Process for Controlling Chrysosporium lignorum in Lignocellulosic // Pat. 3617436 US, CIC B27K03/16. Filed 11.07.1968. Issued 02.11.1971.
 12. Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components / ed. by T. Higuchi. — Academic Press, INC, 1985.
 13. Медведева С.А., Александрова Г.П., Бабкин В.А. Перспективы и трудности использования микроорганизмов в целлюлозно-бумажной промышленности // Химия древесины. — 1991. — № 1. — С. 3–16.
 14. Соловьев В.А., Малышева О.Н. и др. Отбор штаммов грибов по их лигнинразрушающей способности // Экология и защита леса. — Л.: ЛТА, 1982. — Вып. 7. — С. 128–134.
 15. Соловьев В.А., Малышева О.Н. и др. Изменение химического состава древесины под действием лигнинразрушающих грибов // Химия древесины. — 1985. — № 6. — С. 94–100.
 16. Казарцев И.А. Особенности разложения древесины грибами, вызывающими коррозию и делигнификацию: автореф. дис. ... канд. биол. наук. — СПб., 2010.
 17. Медведева С.А. Превращения ароматической компоненты древесины в процессе делигнификации: дисс. д-ра хим. наук. — Иркутск, 1995.
 18. Александрова Г.П.: Микробиологическая деструкция лигнина — основа технологических процессов биоделигнификации: дисс. ... канд. хим. наук. — Иркутск, 1994.
 19. Патент 2037001 РФ, МКИ D21C3/20 Способ получения целлюлозного полуфабриката / Александрова Г.П., Буряченков М.И., Медведева С.А. и др. // Заявл. 14.04.93; опубл. 09.06.95. Бюл. № 16.
 20. Parkinson G. Biopulping promises to cut papermaking costs // Chemical Engineering — 2002. — № 1. — URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
 21. Kirk T.K., Jang H.H. Potential delignification of unbleached kraft pulp with lignolytic fungi // Biotechnol. Letters. — 1979. — Vol. 1. — № 9. — P. 347–352.
 22. А.С. 1650835 СССР, МКИ D21C9/10 Способ отбеливания сульфатной целлюлозы / Бабкин В.А., Соловьев В.А., Медведева С.А. и др. // Заявл. 28.09.88. Опубл. 23.05.91. Бюл. № 19.
 23. Медведева С.А., Александрова Г.П. и др. Экологическое преобразование производства целлюлозы на основе биотехнологий // Химия в интересах устойчивого развития. — 1996. — № 4. — С. 313–320.
 24. Пат. 2118675 РФ, МКИ D21C9/16 Способ отбеливания лиственной сульфатной целлюлозы / Александрова Г.П., Медведева С.А. и др. // Заявл. 21.10.96. Опубл. 10.09.98. Бюл. № 25.
 25. Аксенов А.С. Совершенствование отбеливания сульфатной целлюлозы с использованием ферментов ксиланаз: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Архангельск, 2007.
 26. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства (введена в действие приказом Министерства природных ресурсов от 13.04.2009 г. № 87).
 27. Новые решения для ЦБП (Международная выставка Pulpaper-2010. СПб., 2010). Официальный сайт «Леспроминформ». — URL: <http://www.lesprominform.ru>
 28. Лапин В.В. Нанотехнологии. Не все так просто // Химия в ЦБП: междунар. научн.-практ. конф. Сб. трудов. — СПб., 2009. — С. 31–36.
 29. Основные моменты на мировых рынках и новые технологии. — URL: <http://www.nanopulpandpaper.com>

Biotechnologies for Improvement of Environmental Safety related to Pulp and Paper Industry (actual status)

S.A. Medvedeva, Doctor of Chemistry, Professor, Irkutsk State Technical University

S.S. Timofeeva, Head of Chair, Doctor of Engineering, Professor, Irkutsk State Technical University

Based on the development concept of Russian pulp and paper industry up to 2015 the possible directions of its post-crisis growth and current trends are identified. One of optimal directions to achieve the environmental and resource saving effects in the pulp and paper industry is the introduction of best available technologies. The scientific potential assessment of domestic developments related to some of the best modern biotechnologies that could create a new conceptual basis for evolution of technologies in the pulp and paper industry and improve the environmental industrial safety is given in this paper.

Keywords: pulp and paper industry, environmental safety, biotechnologies, biopulping, biological bleaching, nanobiotechnologies.

Электромагнитные поля в урбанизированном пространстве с металлической крышей

С.М. Аполлонский, д-р техн. наук, профессор

П.В. Коровченко, проректор

Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова

e-mail: pkorovchenko@spbmapo.ru

Ключевые слова:

электромагнитное поле, металлические крыши, кровельное железо, воздействие на человека.

Рассматривается влияние кровельного железа на распределение электромагнитных полей в воздушной среде урбанизированного пространства. Дается приближенная методика расчета этого влияния. Оценивается возможное воздействие на человека.

1. Введение

В урбанизированном воздушном пространстве из-за наличия большого количества источников электромагнитного поля (ЭМП) создается электромагнитная среда широкого частотного спектра. Имеют место ЭМП низкой частоты от линий электропередачи, электромашинных агрегатов, электрифицированного транспорта и др. Ряд источников создают высокочастотные ЭМП. Среди них мобильные средства связи: беспроводной телефон (частоты 814–815 МГц, 904–905 МГц и 450–1800 МГц с различными видами модуляции (11, 50 и 270 Гц)), сотовая связь (частоты от 400 МГц до 2000 МГц) и др. (в том числе пейджинговая связь, транковая связь, мобильная спутниковая связь). Все эти средства связи через ЭМП взаимодействуют с металлическими оболочками в урбанизированном пространстве, обладающими определенными электрофизическими параметрами: γ — электрической проводимостью, μ и ϵ — магнитной и диэлектрической проницаемостью.

Благодаря высокой электропроводимости γ материала оболочек в них возникают вихревые токи, влияющие на перераспределение напряженностей ЭМП. Существенное влияние на перераспределение напряженностей внешнего к оболочкам поля оказывают магнитные (μ) и диэлектрические (ϵ) свойства материала оболочек.

В качестве экранирующих оболочек можно выделить: из сплошных — металлические крыши (кровельное железо); из дискретных — сетчатые экраны. Среди последних: тяговые сети электрифицированного транспорта, многочисленные провода, пересекающие улицы в произвольных направлениях, арматура железобетонных конструкций.

Целью статьи является разработка аналитической модели расчета ЭМП вблизи сплошных металлических оболочек (например, кровельного железа), находящихся в воздушной среде урбанизированного пространства. Рассмотрение ведем применительно к высокочастотным ЭМП ($f > 10^4$ Гц).

2. Методика расчета напряженностей ЭМП в воздушной среде при наличии сплошных металлических структур

*Пространственные гармоники ЭМП*¹. Решение краевой задачи в ортогональной криволинейной системе координат q_1, q_2, q_3 в виде суперпозиции частных решений [1] при использовании теорем сложения [2] сводится к решению системы алгебраических или интегральных уравнений.

Задача по расчету ЭМП от источника на нескольких оболочках $j \in [1, N]$ может быть записана в виде:

$$\Delta T_j + k_j^2 T_j = 0, T_j|_{\Gamma_j} = F_j(q_1, q_2, q_3; \gamma_j, \mu_j, \epsilon_j), \quad (1)$$

¹ Временная зависимость электромагнитного поля выбрана в виде $\exp(j\omega t)$.

при начальных условиях

$$\lim_{q_1 \rightarrow \infty} \sqrt{q_1} \left(\frac{\partial F_j}{\partial x_1} - ikF_j \right) = 0, \quad \lim_{q_1 \rightarrow \infty} F_j = 0,$$

где F_j — любая из составляющих электрической и магнитной напряженностей ЭМП в j -й среде, $T_j = \{v_j, u_j\}$ — магнитный и электрический потенциалы ЭМП.

Напряженности ЭМП имеют вид:

$$\begin{aligned} E_{q_1} &= \frac{\partial^2 u}{\partial q_1^2} + k^2 u; \quad E_{q_2} = \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_2} + \frac{i\omega\mu}{h_{q_3}} \frac{\partial v}{\partial q_3}; \\ E_{q_3} &= \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 u}{\partial q_1 \partial q_3} - \frac{i\omega\mu}{h_{q_2}} \frac{\partial v}{\partial q_2}; \\ H_{q_1} &= \frac{\partial^2 v}{\partial q_1^2} + k^2 v; \quad H_{q_2} = -\frac{i\omega\varepsilon'}{h_{q_3}} \frac{\partial u}{\partial q_3} + \frac{1}{h_{q_2}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_1 \partial q_2}; \\ H_{q_3} &= \frac{i\omega\varepsilon'}{h_{q_2}} \frac{\partial u}{\partial q_2} + \frac{1}{h_{q_3}} \frac{\partial^2 v}{\partial q_1 \partial q_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для высокочастотных ЭМП граничные условия для тонкостенных оболочек используются в виде [3]:

$$T_{j+1} - T_j = q_s^{\alpha(j)} \left(\partial T_j / \partial q_1^{(j)} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial (T_{j+1} - T_j)}{\partial q_1^{(j)}} = -p_s^{\alpha(j)} T_j, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} q_s^{\alpha(j)} &= \{a_s^{(\alpha(j))}, a_s^{(m)(j)}\}, \quad p_s^{\alpha(j)} = \{b_s^{(\alpha(j))}, b_s^{(m)(j)}\}, \quad \alpha \in [\varepsilon, \mu], \\ a_s^{(\alpha(j))} &= i\omega^2 \varepsilon_s^{(j)} \mu_0 k_j^{-2}, \quad a_s^{(m)(j)} = \mu_s \mu_0^{-1}, \quad b_s^{(\alpha(j))} = k_j^2 \mu_s^{(j)} \mu_0^{-1}, \quad (5) \\ b_s^{(m)(j)} &= \omega^2 \varepsilon_s^{(j)} \mu_0, \quad \mu_s^{(j)} = \mu_j \delta_j, \quad \varepsilon_s^{(j)} = \delta_j \left[\varepsilon_j + (i\gamma_j / \omega) \right], \\ k_j &= \sqrt{(\omega\gamma_j \mu_j) / 2}, \quad \varepsilon_s^{(j)}, \mu_s^{(j)} \end{aligned}$$

поверхностные комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости j -й среды, T_{j+1}, T_j — скалярные потенциалы ЭМП до оболочки и за оболочкой; k_j — волновое число j -й среды.

Дальнейшее рассмотрение проводим применительно к источнику, ЭМП которого дифрагирует на полной координатной поверхности. Используя выкладки, содержащиеся в [4], функции взаимовлияния находим в виде:

$$K_{nm}^{Sa} = 1 + \frac{\left[q_s^{\alpha(1)} a_{2nm}^2 + p_s^{\alpha(1)} a_{1nm}^2 \right] \left[P_{nm}(kx_1^{(1)}) / F_{nm}(kx_1^{(1)}) \right]}{\Delta(a_{1nm}^{(1)}, b_{1nm}^{(1)}) - q_s^{\alpha} a_{2nm}^{\alpha} b_{2nm}^{(1)} - p_s^{\alpha} a_{1nm}^{\alpha} b_{1nm}^{(1)}}, \quad (6)$$

где $F_{nm}(kq_1^{(1)}), P_{nm}(kq_1^{(1)})$ — координатные функции расстояния, соответственно, первого и второго рода, для которых существуют следующие предельные соотношения:

$$F_{nm} \left(\begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} \right) = 0, \quad F_{nm}(\infty) \rightarrow \infty, \quad P_{nm} \left(\begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} \right) \rightarrow \infty, \quad P_{nm}(\infty) \rightarrow 0, \quad (7)$$

$F'_{nm}(kq_1^{(1)}), P'_{nm}(kq_1^{(1)})$ — первые производные координатных функций расстояния по координате $x_1^{(1)}$;

$$a_{1nm} = F_{nm}(k\xi_1); \quad a_{2nm} = F'_{nm}(k\xi_1); \quad b_{nm} = P_{nm}(k\xi_1);$$

$$b_{2nm} = P'_{nm}(k\xi_1);$$

$\Delta(a_{1nm}, b_{1nm}) = a_{1nm} b'_{1nm} - b_{1nm} a'_{1nm}$ — Вронскиан; ξ_1 — координата поверхности.

Напряженности (\vec{E}, \vec{H}) ЭМП вблизи поверхности имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{E} \\ \vec{H} \end{cases} = \begin{cases} \vec{E}^{(0)} K^S \\ \vec{H}^{(0)} K^{SM} \end{cases}, \quad (8)$$

где использованы функции взаимовлияния по модулю:

$$K^{Sa} = \left[\frac{1}{N} \sum_n \sum_m (K_{nm}^{Sa})^2 \right]^{0.5}. \quad (9)$$

В выражении (9) учтено N пространственных гармоник ЭМП.

Анализ полученных результатов показывает, что если происходит дифракция ЭМП на оболочке, материал которой хорошо проводит электрический ток, но является маломангнитным ($\mu \approx \mu_0$), то суммарное поле перед оболочкой изменяется в большей мере, чем при дифракции ЭМП на оболочке из ферромагнетика.

Частотные гармоники ЭМП. Можно утверждать, что дифракция внешнего ЭМП произвольного вида на металлической поверхности приводит к появлению в дифрагированном поле значительного количества интергармоник, в их числе и субгармоник. Появление их связано как со статистически неоднородной поверхностью [5], так и с неоднородностью электрофизических параметров экранирующей оболочки [6].

Неоднородные по форме поверхности. Если поверхность экрана не совпадает с координатной поверхностью, но отличается от нее незначительно, то при их расчете необходимо скалярные потенциалы