

Актуальность. Получение бумаги и картона из макулатуры и гофрированного картона с необходимыми физико-механическими свойствами является весьма сложным технологическим процессом. Этим можно объяснить тенденцию в производстве бумаги и картона из макулатуры использования разнообразных химических вспомогательных веществ (ХВВ), которые в общем случае способствуют повышению прочностных характеристик материалов [1, 2]. Однако применение ХВВ оправдано лишь в том случае, когда исчерпаны все меры традиционного способа подготовки макулатурной массы и работы узлов бумагоделательной машины. В частности, особое внимание следует уделять: - проведению фибриллирующего размола вторичного волокна; - усреднению композиции и концентрации массы материального потока; оптимизации значений электрокинетических показателей (в том числе, удельной электропроводности, катионной потребности, дзета потенциала) в системе короткой циркуляции БДМ; - формированию структуры полотна регулированием напорного ящика, сеточного стола, концентрации массы и т.д. [3, 4]; - поддержанию постоянства компонентного состава технологической и оборотной воды при создании условий их очистки и усреднению по составу [7]. На фоне гидромеханических процессов и применения ХВВ в производстве бумаги и картона из макулатуры, появляется весьма сложная проблема микробиологического обрастания материальных потоков [5], которая может быть решена минимизацией жизнедеятельности микроорганизмов в системе водопользования (включая свежую воду). Решение этой проблемы особо актуально в условиях при производстве бумаги и картона из макулатуры при снижении расхода свежей воды и многократного использования оборотной воды. Цель настоящей работы - оценить важность проблемы микробиологического обрастания материальных потоков в производстве бумаги и картона. Для достижения данной цели решались следующие задачи: - систематизировать микроорганизмы материальных потоков производства бумаги и картона; - выявить проблемы, вызываемые микроорганизмами в производстве бумаги и картона; - выявить причины образования биопленок (слизи) в материальных потоках производства бумаги и картона; - оценить основные методы контроля популяции микроорганизмов в материальных потоках производства бумаги и картона; Основные микроорганизмы материальных потоков производства бумаги и картона. Наиболее важными источниками микробного загрязнения являются природная вода, сырье, органические и неорганические добавки, используемые в производстве, повторно использованная вода внутри предприятий, почва и воздушная среда. Основные микроорганизмы в технологической и оборотной воде представлены бактериями, грибами, дрожжами и водорослями. Факторы, которые влияют на популяцию микроорганизмов в производстве бумаги и картона [8]: - оптимальная температура (°C); - освещение; - содержание кислорода (мг/л); - значение pH.

Технологическая и оборотная вода в производстве бумаги и картона имеет значения температуры и pH сопоставимые со значениями температуры и pH оптимальными для существования микроорганизмов и поэтому являются благоприятной средой для их развития по этим факторам. Авторы работ, изучавшие проблему микроорганизмов в производстве бумаги, находили широкую гамму микроорганизмов: - аэробные спорообразующие (*Bacillus*) и не спорообразующие (*Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Klebsiella*, *Flavobacterium*, *Leptothrix*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, and *Staphylococcus*) бактерии, анаэробные бактерии (*Desulfovibrio*), грибы, плесень (*Aspergillus*), дрожжи и иногда морские водоросли [9], - микроорганизмы, встречающиеся во влажных средах *Bacillus*, *Burkholderia*, *Pantoea*, *Ralstonia* и *Thermomonas* [10], - паразитирующие бактерии *Aerobacter aerogenes* [11], - в виде пленок *Deinococcus grandis*, *Flectobacillus*, sp.; *Methylobacterium zatmanii*, *Micrococcus* sp; *Roseomonas* sp [12], - волокнистые бактерии (*Filamentous bacteria* - *Sphaerotilus natans*), - загрязняющие крахмал бактерии формирующие споры и кишечные бактерии (*enterobacterias*) [13], - бактерии, обитающие в сухих условиях *Bacillus* *Brevibacillus*, *Paenibacillus* [10, 13], Для сравнения в материальных потоках нефтеперерабатывающих предприятий встречаются анаэробные бактерии *Desulphovibrio desulfuricans*, обычные грибы *Cladosporium resinae*, дрожжи *Candida* sp., *Saccharomices* sp. В емкостях встречаются бактерии *Thiobacillus*, продуцирующие соединения серы. Установлено, что подсеточная вода при производстве бумаги в нейтральной среде может содержать микроорганизмов около 10⁶ КОЕ/мл, т.е. 1 мЗ подсеточной воды будет содержать 10¹² КОЕ. При массе одной клетки около 10⁻⁹ мг, 10¹² КОЕ должны иметь массу около 1 г. Идентификацию микроорганизмов в материальных потоках бумажной фабрики проводят используя современные методы. В частности, используется метод *ribosomal DNA Sequenz* (*rDNA-Sequenz*). В банках данных насчитывается свыше 700 000 соединений «*rDNA-Sequenz*», позволяющих идентифицировать более 6000 микроорганизмов [14]. Проблемы, вызываемые микроорганизмами в производстве бумаги и картона. Локальные изменения температуры, pH, уровня взвешенных веществ и растворенного кислорода в водной системе могут влиять на популяции бактерий. В открытых системах, благоприятных для аэробных бактерий, обычно развиваются отложения слизи. В закрытых системах повышается уровень анаэробных бактерий, вызывающих проблемы в постоянной части БДМ от отложений слизи до неприятного запаха, коррозии под отложениями, ядовитых газов и деградации волокна. Увеличение температуры и сокращение содержания растворенного кислорода в воде при замыкании цикла водопользования инициируют интенсивный анаэробный бактериальный рост и формирование спор. Кислород участвует в дыхательном процессе, так же как и других биологических функциях. Он используется для окисления органических соединений в клетке, накапливающей энергию, воду и углекислый газ. Система

водопользования обедняется кислородом вследствие растворения твёрдых частиц, повышения температуры и расход кислорода на окисление.

Непрерывная рециркуляция оборотной воды с низкими уровнями дозирования свежей воды может привести к снижению содержания растворенного кислорода с 8 мг/л до 2 - 4 мг/л (рис. 1) [5]. Рис. 1 - Влияние содержания кислорода в технологической воде на популяцию бактерий: по оси абсцисс: содержание кислорода, мг/л; по оси ординат: содержание бактерий, %; в поле рисунка: аэробные и анаэробные бактерии. Температура, наряду с замкнутым водооборотом в материальных потоках оказывает огромное влияние на динамику роста микробов (рис. 2). При температуре выше 50 °С стимулируется развитие популяций термофильных (thermophilic) бактерий (обладающих способностью развиваться при температурах выше 55 - 60 °С) и подавляется рост мезофильных (mesophilic) бактерий (лучше всего растут в пределах 20 - 40 °С). Большинство формирующих слизь бактерий представлены микроорганизмами, функционирующими в мезофильном (mesophilic) диапазоне температур. При температуре выше 60 °С развитие аэробных популяций замедляется, но при этом споры, бактерии (в благоприятных условиях), не инактивируются. Рис. 2 - Влияние температуры подсеточной воды (white water tower) на содержание бактерий (TBC- Total Bacterial Count): по оси ординат - общее содержание бактерий, CFU/мл (слева); - температура (справа) по оси абсцисс - дата отбора проб CFU - colony forming unit (колониеобразующая единица - КОЕ) В общем содержание микроорганизмов увеличивается доля бактерий анаэробной популяции. Увеличение температуры ведёт к росту растворенных органических веществ, повышая питательный потенциал системы водопользования. Каждый вид микроорганизмов эффективно развивается при определённой температуре в довольно узком диапазоне ($\pm 0,5$ °С), однако выживают они в гораздо большем диапазоне температур. Для большинства микроорганизмов, присутствующих в системе БДМ, благоприятная температура в интервале от 35 до 45 °С [15]. В макулатурной массе велико содержание не только бактерий (аэробных, анаэробных, анаэробных спорообразующих), но и грибов и в том числе дрожжей. Длительное хранение волокнистой суспензии приводит к появлению неприятного запаха и другим проблемам, вызванным микробами [14]. Рис. 3 - Слизь на трубах Проблемы качества готовой продукции, вызываемые микроорганизмами: - пятна слизи на коммуникациях и отверстия в бумажном полотне (рис. 3, 4); - неприятный (offensive) запах бумаги и картона; - изменение цвета и белизны; - полосы на покрытии; - пыление. Рис. 4 - Отверстие в полотне бумаги, вызванное слизью Микроорганизмы нарушают устойчивость работы БДМ и вызывают прежде всего обрывы полотна бумаги, а также являются причиной засорения сукон, сеток и сит, что требует проведения не запланированных остановов для промывки и пропарки одежды и узлов БДМ. Продукты метаболизма микробов приводят к снижению pH, которые вызывают

коррозию оборудования. Проблемы техники безопасности. Синтез микроорганизмами дурнопахнущих летучих жирных кислот и токсичного газа - сероводорода нарушает санитарно гигиеническое состояние рабочих мест на БДМ. Микробиологическое обрастание полов и площадок обслуживания на БДМ приводит к нарушению техники безопасности. Микроорганизмы могут разрушить практически все органические и большинство неорганических соединений. Ниже представлены основные источники питания микроорганизмов, присутствующие в материальных потоках БДМ: - крахмал, наполнители, пигменты; - минералы и микроэлементы (соединения азота, фосфора и железа); - лигнин (25 % - в хвойных породах, 21% - в лиственных породах); - углеводы (целлюлоза, глюкоза, гемицеллюлозы - глюкоза, манноза, галактоза, ксилоза, арабиноза). Как указано выше, микроорганизмы в материальных потоках бумажного производства вызывают отложения, биообрастания, коррозию и неприятный запах. Следует подчеркнуть, что основной причиной активности микроорганизмов является технологическая вода - среда благоприятная для роста микроорганизмов и соответствующая по критериям pH, температуры, содержанию водорастворимых органических веществ и другим питательным веществам, а также продолжительности пребывания микроорганизмов в материальном потоке, соответствующее продолжительности цикла культивирования микроорганизмов (прежде всего бактерий) в биореакторе. В результате высокой микробиологической активности образуются биообрастания (biofouling) и отложения микробиологического происхождения, которые влияют на производительность БДМ и качество конечной продукции. Влияние микробиологической активности в материальных потоках БДМ более актуальной на бумагоделательных предприятиях с замкнутыми водными контурами. Биопленки в материальных потоках производства бумаги и картона. Биопленки (слизь) слизь ассоциируются с нарастанием или накоплением микробных клеток на любой находящийся под водой поверхности. В слизи микроорганизмы захватываются (trapped) органической полимерной матрицей микробного происхождения - внеклеточными полисахаридами. Эта матрица обеспечивает удержание в слизи отложений из загрязнений, а также выделяемых продуктов метаболизма. Формирование слизи и её состав зависят от происхождения загрязнений, механизма инициирования и последующих условий роста микроорганизмов. Хотя и были предложены различные механизмы для описания биопленок и их эволюции, общепризнанным рассматривается механизм из шести этапов, показанных на рис. 5 [16, 17, 18]. Микроорганизмы в пленках имеют преимущества в развитии. Их концентрация внутри слизи на три-четыре порядка выше, чем в жидкой среде рядом с поверхностью и изменяется от 10^4 до 10^{12} КОЕ/см³ [17, 18]. Микробиологическая ассоциация обеспечивает рост микроорганизмов на поверхности материалов, традиционно считающихся токсичными для них [16]. Рис. 5 - Механизм биообрастания Биоплёнки являются

динамичными системами и в них наблюдаются явления переноса. При этом очень важны значения pH и градиента концентрации. Изменения в условиях окружающей среды могут вызвать появление анаэробных условий в нижней части слизи, инициирующие рост анаэробных разновидностей микроорганизмов, подобных сульфат восстанавливающим бактериям, и вызывающим проблемы коррозии и запаха [19-21]. Микроорганизмы, присутствующие в биопленках, могут отличаться на разных предприятиях. Кроме того климатические условия и особенности технологи на предприятиях могут инициировать образование биопленок, в которых микроорганизмы представлены различными видами. Существует баланс между экологическими (физическими и относящимися к питанию) и биологическими (interbiotic) факторами, которые влияют на состав биопленок, обусловленный тесной связью микроорганизмов, присутствующих на конкретных предприятиях. Однако, и в этом случае у микробиологических отложений (слизи) есть сходство [16]: Биопленки (слизь) нуждаются в сообществе разновидностей бактерий. При этом широко распространённое микробное сообщество в отложениях слизи представлено бактериями, грибами, водорослями, дрожжами и даже обычными простейшими одноклеточными животными организмами (protozoa), и все они вызывают слизь в промышленных средах. Большинство микроорганизмов являются представителями инкапсулированных, быстро растущих разновидностей бактерий, таких как *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Proteus*, *Bacillus* и других. Кроме того, бактерии, чаще всего обнаруживаемые в слизи БДМ и КДМ, включают разновидности *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Flavobacterium*, *Clavibacter*, и др. Имеются также некоторые грибы, обычно присутствующие в слизи, такие как *Aspergillus*, *Cephalosporium* and *Penicillium*. У каждого отложения слизи наблюдаются две группы микробных популяций. Первоначально сформированная слизь аккумулирует микробную популяцию бактериальных разновидностей, в которую входят *Enterobacter agglomerans* или *Pseudomonas aeruginosa* и дрожжи (например, *Rhodotorula mucilaginosa*) [16]. Эти основные формирования инициируют рост колоний вторичных микроорганизмов, к которой принадлежат сульфат восстанавливающие виды бактерий и *Penicillium* [16]. Различие между формирующимися первичной и вторичной слизью очень условное (неясное, трудно уловимое), потому что методически сложно оценить важность отдельных видов в популяции микроорганизмов образующих слизь. Такая неопределенность происходит из-за изменений в концентрации питательной среды, присутствия ингибиторов и стимуляторов роста, физических условий, сезонных изменений, природы волокнистой суспензии, чистоты процесса и т.д. [22, 23]. Биопленки, также как и микроорганизмы в жидкой части материального потока, вызывают некоторые проблемы. При отделении слизи ухудшаются свойства конечной продукции. Слизь может также вызывать потери производительности из-за простоев и высокой стоимости химических

обеззараживающих веществ. Микроорганизмы в слизи могут инициировать микробиологически индуцируемую коррозию (microbiologically induced corrosion =MIC) и генерировать газы, вызывающие проблемы неприятного запаха и риск взрывов. Наличие нежелательных газов создаёт риск взрыва из-за их накопления в очень плохо проветриваемых участках. Установлено, что на предприятиях, вырабатывающих бумагу и картон, где имели место взрывы, последние были вызваны водородом (H₂). Кроме того, более 50 % взрывов произошло при пуске бумагоделательных машин. Водород может выделяться при жизнедеятельности различных микроорганизмов, таких как Clostridium, Eubacterium и Fusobacterium в анаэробных условиях. Метан (CH₄), продуцируемый бактериями - это ещё один газ, который связан с риском взрывов. Пирит (FeS) получаемый в результате анаэробных реакций железа и серы, может привести к самовозгоранию [16]. Контроль популяции микроорганизмов в биопленках. Для принятия организационно технических решений по снижению популяции микроорганизмов в материальных потоках бумажного производства необходим качественный и количественный контроль. На практике применяются следующие решения для измерения и контроля образования биопленок: - визуальная оценка чистоты машины; - развитие иных микробиологических методов (например, анаэробных); - контроль содержания аденозинтрифосфата (АТФ) как универсального биологического индикатора. Метод основан на принципе биолюминисценции, свечении живых организмов, в основе которого лежит катализируемая специфическим ферментом, люциферазой, хемилюминесцентная реакция. Для измерений используется прибор люминометр [24, 25, 26]; - измерение содержания слизи в режиме онлайн с использованием конкретных устройств (датчиков). Выводы Систематизированы микроорганизмы материальных потоков производства бумаги и картона. Выявлены проблемы, вызываемые микроорганизмами в производстве бумаги и картона. Установлены причины образования биопленок (слизи) в материальных потоках производства бумаги и картона. Приведены основные методы контроля популяции микроорганизмов в материальных потоках производства бумаги и картона.