ГЛАВА I

УДК 629.02

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Зырянов Михаил Алексеевич

к.т.н., доцент

Медведев Сергей Олегович

к.э.н., доцент

Мохирев Александр Петрович

к.т.н., доцент

Давыденко Алексей Николаевич

Лесосибирский филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Сибирский
государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»

Аннотация: На сегодняшний день в России остро стоит проблема переработки отходов лесозаготовительной и деревоперерабатывающей промышленности. Практически на всех стадиях лесопромышленного производства образуются отходы, которые утилизируются или оставляются на перегнивание. Порубочные остатки, получаемые в процессе лесосечных работ, используются менее всего, при том, что переработка данного вида древесного сырья позволит убрать с лесосек часть отходов лесозаготовок, тем самым снизив экологическую и пожароопасную нагрузку на регион. В настоящее время на вырубленных площадях лесозаготовители оставляют до 30 % только стволовой части деревьев, прежде всего низкотоварной древесины, не говоря уже о сучьях, хвое, пнях, тогда как отходы лесозаготовок - это ценное сырье, которое можно и нужно использовать для дальнейшей переработки. В статье рассмотрен вопрос о перспективах развития лесопромышленного комплекса, связанных, в том числе, с рациональным использованием древесных ресурсов. Рассмотрено производство древесного волокна и его место в решении вопроса комплексного использования древесных отходов лесозаготовительной и

деревоперерабатывающей промышленности. Предложена конструкция для получения древесного волокна в условиях гидродинамического воздействия в совокупности с ножевым размол в производстве древесноволокнистых материалов. Выполнено моделирование процесса размола в дисковой ножевой машине в программе SOLID WORKS. Представлены результаты исследования процесса возникновения кавитации при ножевом размоле.

Ключевые слова: размол, древесное волокно, совмещение, кавитация, моделирование, дисковая мельница.

DEVELOPMENT OF A DEVICE DESIGN FOR PROCESSING PLANT WASTE IN AN AQUATIC ENVIRONMENT USING EXPERIMENTAL MODELING

**Zyryanov Michael Alekseevich
Medvedev Sergey Olegovich
Mokhirev Alexander Petrovich
Davydenko Alexey Nikolaevich**

Abstract: Today in Russia there is an acute problem of processing waste from the logging and wood processing industry. Almost all stages of timber production generate waste that is disposed of or left to rot. Felling residues obtained during logging operations are used least of all, despite the fact that the processing of this type of wood raw materials will remove some of the logging waste from the cutting areas, thereby reducing the environmental and fire-hazardous load on the region. Currently, loggers leave up to 30% only of the tree trunk, primarily low-quality wood, not to mention branches, conifers, and stumps, while logging waste is a valuable raw material that can and should be used for further processing. The article discusses the prospects for the development of the timber industry, including those related to the rational use of wood resources. The article considers the production of wood fiber and its place in solving the issue of integrated use of wood waste from the logging and wood processing industries. A design is proposed for producing wood fiber under hydrodynamic conditions in conjunction with knife grinding in the production of wood fiber materials. Modeling of the grinding process in a disk knife machine in the SOLID WORKS program is performed. The results of a study of the process of cavitation occurrence during knife grinding are presented.

Key words: grinding, wood fibers, combining, cavitation, modeling, disk mill.

До недавнего времени в лесной промышленности признавался ценным только ствол, а все остальное, в том числе крона считались отходами, которые загромождали территории лесосек, а также считались опасным сырьём при возникновении возможных пожаров. В настоящее время используется всего около 0,7 млн. т. древесных отходов, что составляет 3-4 % общих ее ресурсов, которые можно было бы использовать при современном уровне лесозаготовок. [1, с. 847].

Анализ литературных источников на предмет способов получения древесного волокна показал, что операция получения древесного волокна осуществляется двумя способами: ножевым и безножевым. Ножевой способ заключается в передаче энергии волокнам посредством силового прямого контакта от лежащих друг напротив друга жестких рабочих элементов к защемленному между ними, деформируемому слою волокнистого материала. Сущность безножевого способа можно рассмотреть на примере установки типа «Струя-преграда», в которой происходит передача энергии посредством силового воздействия физических процессов и явлений на волокна свободно движущиеся в жидкой среде. К силовым факторам данного типа воздействия относятся: кавитация, пульсации гидродинамического давления, усилия сдвига в градиентном потоке, трения волокон друг о друга, а также о жесткие элементы машин, напряжения, носящие турбулентный характер [2], [3].

В производстве древесных волокон, применяют в основном ножевой способ размол, используя дисковые или конические мельницы. Недостаток данного способа в том, что древесные волокна подвергаются рубящему и раздавливающему воздействию, что негативно сказывается на качественных характеристиках древесного волокна. К таким показателям относится: средняя длина волокна, механическая прочность волокна, способность к межволоконной связи и удельная поверхность волокон. В свою очередь, безножевой способ обеспечивает более мягкий, щадящий режим размол, что обеспечивает высокие значения качественных показателей волокна, а именно способность к межволоконной связи и удельную поверхность волокон. При этом применение безножевой способ размол, самого по себе, как такового, имеет ряд недостатков, таких как: высокая энергозатратность; неоднородность получаемой древесной фракции; невозможность точного контроля размол древесной массы на древесные волокна. Ввиду этого безножевой способ размол не получил широкого применения в промышленности [4, с. 86].

На наш взгляд необходимо рассмотреть возможные пути контроля безножевого способа размол с целью использования точечного воздействия

(расщепления) на пучки волокон. Для этого необходимо рассмотреть основные факторы, влияющие на безножевой способ размола и выявить наиболее значимый, который позволит контролировать процесс размола.

Процесс, оказывающий значительное влияние на качество древесного волокна в безножевом способе является процесс кавитации. Данный процесс можно использовать, как ключевой фактор усовершенствования процесса размола.

Кавитация (холодное кипение) - явление образования паровых каверн в жидкости при достаточном понижении давления, развития и последующего их замыкания при повышении давления. От обычного кипения кавитация отличается тем, что при ней процесс предопределяется изменением давления вне каверны, а при кипении давление растет внутри каверны [5, с. 22].

Процесс вскипания происходит за очень малые промежутки времени и носит характер взрыва. Сплошность потока нарушается, однофазная среда превращается в двухфазную. В жидкости образуются и составляют в ней существенный объем полости, заполненные паром, так называемые паровые каверны. Если паровые каверны движутся вместе с потоком, то они попадают в зону повышенного давления. Происходит практически мгновенная конденсация пара в каверне, каверна замыкается, создавая весьма значительные давления, высокие температуры, электрические разряды, свечение, активизируя химические, в частности коррозионные, процессы. Мощный гидравлический удар, сопровождающий замыкание кавитационной каверны (табл. 1) приводит к разрушению материала, находящегося в радиусе действия и направления. При определенной степени развития кавитации характер течения настолько трансформируется, что заметно меняются внешние интегральные характеристики течения.

Таблица 1

Развитие кавитационного пузырька всхлопывающегося в виде каверны

Схематическое изображение
Фаза	Образование ядра	Расширение	Достижение максимального радиуса	Коллапс	Взрыв
Описание процесса фазы	Разрыв сил сцепления в жидком континууме образования пустоты	Рост пустот при постоянной подаче энергии	Максимальный рост пустот при постоянной подаче энергии	Разрушение пустоты (полости) при удалении источника энергии	Высвобождение энергии

После гидродинамической обработки (рис. 1 б) за счет фибрилляции поверхность древесных частиц характеризуется большей удельной поверхностью, чем частицы до гидродинамической обработки (рис. 1 а). При уплотнении древесного ковра между плитами пресса в точках перекрещивания обработанных частиц создается высокое давление и пластифицированные древесные частицы сближаются, что приводит к росту числа и площади контактов между ними [6], [7].

Рис. 1. Условное связеобразование получаемых древесных частиц до и после гидродинамической обработки

а – структура из необработанных частиц;

б – структура из гидродинамически обработанных частиц

1 - древесные частицы без гидродинамической обработки различных фракций; 2 - пора; 3 - связеобразование между необработанными древесными частицами; 4 - древесные частицы после гидродинамической обработки различных фракций; 5 - связеобразование между обработанными древесными частицами

Для обеспечения возникновения кавитационного эффекта необходимо добиться местного перепада давления, это можно осуществить местным сужением потока (эффект Вентури) и усилением турбулентности. Анализируя процесс возникновения кавитационного эффекта обнаружили, что данный эффект в той или иной мере проявляют себя в ножевом способе размола, а именно в дисковых ножевых мельницах. Рисунок применяемых ножевых гарнитур, главным образом построен в виде системы ножей и канавок, ориентированных вдоль радиуса под некоторым углом.

Для проверки выдвинутой теории прибегли к помощи компьютерного моделирования процесса движения пульпы при размоле в дисковых ножевых машинах (рис. 2). Моделирование процесса осуществлялось в программе SOLIDWORKS.

**Рис. 2. Модель процесса движения пульпы в межножевых канавках
при размоле в дисковых ножевых машинах**

Анализируя полученную модель можно увидеть, что в процессе работы профиль ножей постепенно закрывают канавки соосного ножевого диска, уменьшая зазор между канавками двух дисков, по причине чего происходит местное сужение потока. А за счёт того, что в ножевых мельницах волокнистая суспензия перемещается по рабочей поверхности центробежной силой в случаях перекрытия канавок ножами суспензия, ударяясь о стенки полости провоцирует возникновение турбулентности (рис. 2).

Таким образом, проведя анализ созданной модели процесса движения суспензии в дисковых ножевых машинах на наш взгляд целесообразно комбинировать ножевой и безножевой способы размола для того, чтобы силовые воздействия прямого контакта жестких элементов ножевого способа, сопровождались кавитацией, как процессом безножевого способа размола. Реализация на практике комбинированного способа размола позволит получать древесноволокнистый полуфабрикат с заданными качественными и количественными показателями и меньшей себестоимостью.

Для реализации комбинированной машины совмещающей ножевой и безножевой способ получения древесного волокна была разработана конструкция устройства для размола щепы в гидродинамической среде состоит из следующих основных элементов (рис. 3): электродвигатель 1; муфта 2; подшипниковый узел 3; размольный узел 4; суппорт 5; направляющие 6; регулировочная рукоять 7.

**Рис. 3. Устройство для размола щепы в гидродинамической среде
(общий вид)**

Конструкция размольного узла, представленного на рис. 3 состоит из следующих основных элементов: роторный вал 1; уплотнительный узел 2; коническая наборная шайба 3; кавитационные гарнитуры 4; направляющий корпус 5; рем-болт 6; роторная размалывающая ножевая гарнитура 7; статорная размалывающая ножевая гарнитура 8; входной патрубок 9; регулировочный болт 10; наборная шайба ножевой гарнитуры 12; заглушка 14.

Устройство работает следующим образом: электродвигатель 1 (рис. 3) через муфту 2 (рис. 3) соединен с роторным валом 1 (рис. 4). На валу с помощью наборных шайб 3, 12 (рис. 4) закреплены диски кавитационной 4 (рис. 4) и ножевой 7, 8 (фиг 4) гарнитур. Распаренная щепа с помощью шнековой подачи поступает в зону размола через отверстие в статорном ножевом диске 8 (рис. 4), после чего под действием центробежной силы создаваемой роторным ножевым диском 7 (рис. 4) щепа проходит через зону ножевого размола 11 (рис. 4), на периферии дисков получаем древесную массу грубого помола, которая направляющим корпусом 5 (рис. 4) попадает в зону кавитационного размола 13 (рис 4), представленную в виде двух дисков с кавитационным эффектом, после чего полученный древесноволокнистый полуфабрикат через сливной патрубок покидает устройство для размола.

Регулирование зазора между дисками осуществляется за счёт суппорта передвижения 6 (рис. 3) на котором закреплён электродвигатель.

**Рис. 4. Устройство для размола щепы в гидродинамической среде
(размольный узел)**

Конструкция устройства, позволяет получать древесноволокнистый полуфабрикат однородного гранулометрического состава с увеличенной за счет дополнительного фибриллирования удельной поверхностью волокна.

Разработанная комбинированная размалывающая машина способна заменить две существующие ступени и упростить технологический процесс

получения древесноволокнистого полуфабриката. На рынке есть большой ассортимент перерабатывающего оборудования, в том числе размалывающего. Однако любая размалывающая машина из всего ассортимента специализируется на конкретном способе размола, ножевом или безножевом [8]. Разработанная комбинированная машина совмещает два способа размола используя их положительные стороны (ножевой способ – быстрое разделение на пучки волокон с минимальной затратой энергии; безножевой способ – представлен в виде такого гидродинамического явления, как кавитация, проявляющая при размоле щадящий режим с возможностью воздействия на поверхность волокна «распушая» его, тем самым увеличивая удельную поверхность связывания).

Получение древесного волокна в предлагаемой комбинированной машине выполняется в двух зонной стадии размола. В первой зоне установлены два ножевых диска, которые размалывают щепу на пучки волокон и отдельные волокна. Во второй зоне установлены два кавитационных диска, которые за счет кавитационного эффекта расщепляют пучки на отдельные волокна с фибриллированной поверхностью.

Ножевая размалывающая гарнитура дисковой мельницы (рис. 5) [9], характеризуется тем, что она состоит из роторного и статорного дисков, рабочие кольцевые поверхности которых разделены на сегменты, состоящие из четырех равных секторов, снабженных параллельными криволинейными ножами, на рабочей поверхности сектора между ножами и перегородками выполнены межножевые канавки, при этом отношение ширины канавки к высоте равно единице.

Рис. 5. Ножевая размалывающая гарнитура дисковой мельницы

Режущие кромки ножей размещены под углами к радиальной кромке каждого сектора $\alpha_1=12-14^\circ$, $\alpha_2=15,5-17,5^\circ$, $\alpha_3=19-21^\circ$, $\alpha_4=22,5-24,5^\circ$, что обеспечивается смещением центров окружностей ножей относительно друг друга на величины 160-180 мм и 25-28 мм, между ножами выполнены перегородки под углами, равными $\beta_1=40^\circ$, $\beta_2=46,5^\circ$, $\beta_3=53^\circ$, $\beta_4=59,5^\circ$.

Кавитационная размалывающая гарнитура дисковой мельницы (рис. 6) состоит из статорного и роторного дисков. Гарнитура состоит из сегментов, которые в сумме образуют кольцо. Рабочая поверхность каждого из размалывающих дисков имеет ножи предварительного размола I, разгонную зону II, центральную III и периферийную IV кольцевые зоны с ножами 1 и межножевыми канавками 2.

Рис. 6. Кавитационная размалывающая гарнитура дисковой мельницы

Ножи на роторном диске установлены против направления вращения диска, линия сектора разделяет третью и четвертую зоны на (первичные и вторичные) ножи главного действия и до размалывающие (периферийные) ножи, при этом четвертая группа ножей сектора представляет собой копию третьей части ножей в отношении 1:2, развернутой на $\alpha=100^\circ-110^\circ$ к ножам третьей зоны сектора, при этом режущие кромки ножей размещены под углами к радиальной кромке каждого сектора, равными $\beta_1=58-63^\circ$, $\beta_2=13-16^\circ$ и наименьшее расстояние между ножами составляет $d=10-13$ мм. Зона два, представляет собой разгонную зону с переменным сечением $a=12-16$ мм, $b=30-35$ мм, при этом высота ножа $h=8-11$ мм. Между третьей и второй зонами $c=10-15$ мм, происходит понижение давления, за счёт чего в потоке суспензии образуются пузырьки кавитации. Попадая в зону три наблюдается резкое увеличение давления, что приводит к схлопыванию образовавшихся пузырьков и высвободившаяся кумулятивная струя воздействует на волокна находящиеся в завихрении зоны три. В зоне четыре волокна повторно подвергаются размолу на дополнительных ножах.

Для проверки работоспособности предлагаемой гарнитуры для фибриляционного воздействия на древесное волокно была определена рабочая площадь гарнитур.

Параметры используемых для проектирования гарнитур приведены в таблице 2.

Таблица 2

Конструктивные параметры размалывающих гарнитур

Размалывающая гарнитура	ширина ножа, мм	угол установки ножей статора, рад	угол установки ножей ротора, рад	угол при вершине сектора, рад	внешний радиус диска, мм	внутренний радиус диска, мм	частота вращения ротора, об/мин
Ножевая	7	$\pi/1,07$	$\pi/14,5$	$\pi/3$	500	380	1000
Кавитационная	2-10	Согласно рисунку		$\pi/3$	500	380	1000

Методика определения рабочей площади гарнитур заключалась в следующем: строим в программе «КОМПАС 3D» объемную модель

размалывающей гарнитуры; по модели определяем число ножей на одном секторе; удалив все с модели, кроме ножей в зоне размола, проецируем полученную модель на чертеж; создаем копию полученного чертежа и при помощи инструмента «Заливка» окрашиваем ножи гарнитуры в контрастные цвета, после чего располагаем их друг к другу под углом; с помощью инструмента «Площадь», определяем рабочую поверхность [10].

Таблица 3

**Рабочая поверхность размалывающих гарнитур
относительно угла поворота**

Угол поворота ротора относительно статора, °	Рабочая поверхность ножевой размалывающей гарнитуры, мм ²	Рабочая поверхность кавитационной размалывающей гарнитуры, мм ²
0	72116	116036
10	72764	75810
20	72044	76410
30	71882	97984
40	72542	76500
50	71246	76764
60	72116	116036
Среднее значение	71975	94388

Поскольку размалывающие гарнитуры состоят из секторов по 60°, то рабочая зона кавитационной размалывающей гарнитуры составляет 566328 мм².

Анализируя полученные значения, видим, что средняя площадь рабочей зоны предлагаемой гарнитуры значительно выше, чем у существующей промышленной. Максимальное значение площади рабочей зоны предлагаемой гарнитуры наиболее приближенно к ½ общей площади зоны размола. Согласно литературным данным, гарнитура с рабочей поверхностью ножей, составляющей 50% от всей ее площади, фибриллирует и частично укорачивает волокно [11], [12]

По результатам расчета конструктивных параметров размалывающих органов дефибратора и устройства для размола щепы в гидродинамической среде в программе Matlab были построены графические зависимости секундной режущей длины и количества точек пересечения ножей в пределах

сектора гарнитуры от угла поворота ротора относительно статора. Зависимости представлены на рисунках 7-10.

Рис. 7. Зависимость значения показателя секундной режущей длины от угла поворота ротора относительно статора гарнитуры дефибратора

Рис. 8. Зависимость количества точек контактов кромок ножей от угла поворота ротора относительно статора гарнитуры дефибратора

Рис. 9. Зависимость значения показателя секундной режущей длины от угла поворота ротора относительно статора гарнитур устройства для размола щепы в гидродинамической среде

Рис. 10. Зависимость количества точек контактов кромок ножей от угла поворота ротора относительно статора гарнитур устройства для размола щепы в гидродинамической среде

Из графических зависимостей видно, что для дефибратора среднее значение показателя секундной режущей длины достигает $3,1 \cdot 10^7$ мм/с, а количество точек пересечения ножей в пределах сектора составляет 55 шт. Для разрабатываемого устройства среднее значение показателя секундной режущей длины достигает $9,1 \cdot 10^7$ мм/с, а количество точек пересечения ножей в пределах сектора составляет 166 шт.

С целью проверки разработанной конструкции были спланированы и реализованы серии экспериментов, результаты которых приведены в таблице 4. В таблице 4 приведены сравнительные характеристики

древесноволокнистого полуфабриката, полученного традиционно на дефибраторе и рафинаторе и с использованием устройства для размола щепы в гидродинамической среде.

Как видно из таблицы 4, при размоле щепы в предлагаемом устройстве повышается фракционный показатель качества помола за счет увеличения процентного содержания в общей массе мелкой фракции фибриллплазмы группы А и мельштоффа группы Б, способствующие повышению плитообразующих свойств древесноволокнистого полуфабриката.

Таблица 4

Сравнительный анализ размола технологической щепы традиционным способом в дефибраторе и рафинаторе, и в предлагаемом устройстве

Устройство для размола	Фракционный показатель, г.	Степень помола, ДС	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Набухание, %
Дефибратор и рафинатор	29,7	21,6	36	842	27	25
Устройство для размола щепы в гидродинамической среде	38,7	17,8	41,2	849	24	23

Степень помола массы несколько меньше чем при традиционном размоле в дефибраторе и рафинаторе и составляет 17,8 ДС, однако, плиты, полученные из этой массы сохраняют в полной мере свои качественные характеристики и соответствуют ГОСТ 4598-86. Гранулометрический состав получаемой древесной массы, удовлетворяет требованиям к сырью для производства древесноволокнистых полуфабрикатов.

Таким образом, проведя анализ литературных источников на предмет безножевого размола и созданной модели процесса движения суспензии в дисковых ножевых машинах на наш взгляд целесообразно комбинировать ножевой и безножевой способы размола для того, чтобы силовые воздействия прямого контакта жестких элементов ножевого способа, сопровождались

кавитацией, как процессом безножевого способа размола. Реализация на практике комбинированного способа размола позволит получать древесноволокнистый полуфабрикат с заданными качественными и количественными показателями и меньшей себестоимостью. Снижение себестоимости древесноволокнистого полуфабриката обеспечивается снижением энергетических затрат, увеличение срока эксплуатации размольного оборудования и сокращение его количества благодаря переходу на размол в одну ступень.

Примечание

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ - для молодых ученых - кандидатов наук МК-1902.2019.6. Проект «Разработка и внедрение эффективной технологии комплексной переработки лесосечных отходов» проведен при поддержке Красноярского краевого фонда науки».

Список литературы

1. Зырянов М.А., Мохирев А.П., Рябова Т.Г., Карпук С.А. Разработка и экспериментально-теоретическое обоснование технологии переработки порубочных остатков древесины // В мире научных открытий. 2015. № 12-3. С. 845-853.
2. Зырянов, М. А. Основные тенденции развития производства древесноволокнистой массы/М. А. Зырянов, Н. Г. Чистова, Ю. Д. Алашкевич; Лесосибирский филиал СибГТУ. - Лесосибирск, 2011. -9 с. - Деп в ВИНТИ 14.02.11, № 68-В2011.
3. Зырянов, М.А., Чистова Н.Г. Производство древесноволокнистых плит при одноступенчатом размолу щепы // Лесной журнал. 2013. - № 6 (336). – С. 115-118.
4. Чистова Н.Г. Размол древесноволокнистой массы на промышленных установках при производстве ДВП: Диссертация // СибГТУ – Красноярск, 2000 – 194 с.
5. Алашкевич Ю.Д. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
6. Чистова, Н. Г. Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. д-ра техн. наук: 05.21.03 // Красноярск, 2010. 461 с.
7. Набиева, А. А. Оценка влияния и совершенствования основных технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис...канд.

техн. наук: 05.21.03: защищена 24.09.04 / А. А. Набиева – Красноярск, 2004. – 182 с.

8. Кондрашов А.И., Литвинов А.В., Сандлер Ф.Х. Повышение эффективности работы дисковых мельниц // Бумажная пром-сть. - 1973. - № 2. - С. 16 – 17

9. Патент № 2288313. Российская федерация, МПК7 D21D, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура дисковой мельницы/ Алашкевич Ю.Д., Ковалев В.И., Невзоров А.И.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2003122181.; заявл. 15.07.2003; опубл. 27.04.2004, Бюл. № 12. – С. 8.

10. Кожухов, В. А. Размол волокнистых полуфабрикатов в размольных ножевых машинах при ударном воздействии на волокно: дис...канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 10.04.15 / В. А. Кожухов – Красноярск, 2015. – 161 с.

11. Pizzi, A. Advanced Wood Adhesives Technology / A. Pizzi. – Basel: Marcel Dekker Inc., 1994. 289 p.

12. Der Einfluss des Feinstoffs auf die Faserstoff- und Papiereigenschaften / Alber W., Erhard K., Reinhardt B. // Wochenbl. Papierfabr. :Fachzeitschrift fur die Papier -, Pappen – und Zellstoff-Industrie. 2000. №19. pp. 1308-1312.

© М.А. Зырянов, С.О. Медведев,
А.П. Мохирев, А.Н. Давыденко, 2020