

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗООЧИСТКИ ПРИ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Д.Ф. Зиатдинова, М.А. Мозохин

Проведен анализ современного состояния процесса сульфатной варки целлюлозы и утилизации образующихся вследствие данного процесса выдувных паров. На основании уравнений материального и теплового балансов, разработана математическая модель технологического процесса разгрузки варочного котла в выдувной резервуар при сульфатной варке целлюлозы. Приведена принципиальная схема установки для извлечения токсичных компонентов из паров вскипания.

Ключевые слова: целлюлоза, температура, давление, сброс давления, утилизация выдувных паров, конденсация смешением, древесная масса, газоочистка, сульфатная варка, математическая модель

The analysis of a current state of process of sulphatic cooking of cellulose and utilization being formed owing to this process blown pair is carried out. On the basis of the equations of material and thermal balances, the mathematical model of technological process of unloading of a cooking copper in the blown tank is developed at sulphatic cooking of cellulose. The schematic diagram of installation for extraction of toxic components from pair boiling up is provided.

Keywords: cellulose, temperature, pressure, pressure dumping, utilization blown pair, condensation by mixture, wood pulp, gas purification, sulphatic cooking, mathematical model

Деятельность предприятий, занимающихся химической переработкой древесины, сопровождается технологическими выделениями из работающих аппаратов и оборудования значительных количеств различных токсичных веществ в виде паров и газов. С целью предотвращения попадания их в атмосферу отходящие газы подвергаются очистке. Ярким представителем такого производства, загрязняющим атмосферу, является периодический процесс сульфатной варки целлюлозы. Наибольший выброс токсичных веществ: сероводорода, демитилсульфида, метилмеркаптана наблюдается при выгрузке содержимого варочных котлов в выдувной резервуар [1].

Теоретические исследования показали слабые и сильные стороны существующих способов очистки выбросов, среди которых на промышленных предприятиях для улавливания парогазовых выбросов используется абсорбция [2]. Но, исходя из недостатков этого способа, перспективным представляется улавливание токсичных паров высоких концентраций конденсацией при герметизации оборудования [3]. К тому же конденсация позволяет улавливать пары с высокой концентрацией вредных веществ непосредственно в зоне парообразования, что повышает ее эффективность. Кроме того, улов многокомпонентных паровых смесей методом конденсации можно сопровождать получением растворов, обогащенных как низкокипящими, так и высококипя-

щими компонентами [4]. Однако применение этого способа затруднено без совершенствования математических моделей, адекватно описывающих процесс и разработки инженерной методики расчета технологических режимов и конструктивных параметров оборудования для проведения процесса улавливания. Вместе с тем, для разработки математической модели могут быть использованы существующие исследования процесса конденсации отдельных веществ [5, 6].

Для анализа использованы принципы математического моделирования, основанные на решении системы дифференциальных уравнений переноса тепла и массы. На основании уравнений материального и теплового балансов, разработана математическая модель технологического процесса разгрузки варочного котла в выдувной резервуар при сульфатной варке целлюлозы.

Математическую модель усовершенствованного процесса можно составить на основе уравнений материального и теплового балансов применительно к паровой и жидкой фазам [1].

Паровая фаза:

При идеальном перемешивании компонентов пара уравнение материального баланса по i -му паровому компоненту можно записать в виде

$$j_i F - Q_k \rho_i = V_{cs} \frac{d\rho_i}{d\tau}, \quad (1)$$

Первый член левой части определяет приток i -го компонента в паровую фазу за счет испаре-

ния; второй член – отвод i -го компонента из аппарата в систему удаления; правая часть – изменение массы i -го компонента в объеме аппарата.

Уравнение теплового баланса паровой смеси определяется по соотношению

$$\rho_{псм} c_{псм} V_{св} dT = c_{см} FT \left(\sum_{i=1}^n j_i \right) d\tau - Q_k \rho_{псм} c_{псм} T d\tau \quad (2)$$

Левая часть уравнения – изменение теплосодержания смеси; первый член правой части – приток тепла с паровой смесью удаляемой с поверхности жидкости; второй член – отвод тепла из реактора за счет производительности конденсатора.

Жидкая фаза:

Дифференциальное уравнение переноса энергии для жидкой фазы имеет вид

$$c_{жс} m_{см} dT + c_{см} T dm_{см} + m_{см} T dc_{см} = \sum_{i=1}^n Q_{i3} c_i T_{in} d\tau - \sum_{i=1}^n j_i c_{жс} T F d\tau - \sum_{i=1}^n j_i r_i F d\tau \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) определяет изменение теплосодержания жидкой смеси; первое слагаемое правой части характеризует приход тепла с загружаемыми компонентами; второе – потерю тепла с уходящими парами компонентов; третье – расход тепла на парообразование.

Дифференциальное уравнение переноса массы можно записать соотношением

$$dm_{см} = \sum_{i=1}^n Q_{i3} d\tau - \sum_{i=1}^n j_i F d\tau \quad (4)$$

Левая часть уравнения определяет изменение массы i -го компонента в реакторе; первое слагаемое правой части характеризует изменение массы i -го компонента за счет загрузки компонента, второе – за счет испарения i -го компонента.

Совместное решение уравнений теплового и материального баланса для паровой и жидкой фазы позволяет определить кинетические зависимости технологического процесса.

С целью выявления параметров процесса был проведен ряд исследований. В качестве модельного раствора использовали черный щелок получаемый в процессе сульфатной варки древесной щепы, справочные данные на него наиболее полно представлены в литературе.

Перед каждым опытом контролировалась работоспособность приборов, проверялась теплоизоляция всех элементов, осуществлялась тарировка термомпар. В ходе опытов регистрировались технологические параметры процесса: давление, температура. Отбор проб смеси проводился через 30 минут.

Экспериментальные данные снимались на установке (рис. 1) следующим образом: перед началом эксперимента модельный раствор загружался в реактор 1. С помощью вакуумного насоса 11, открыв все вентили, из системы откачивается инертный газ и закрывается вентиль 15.

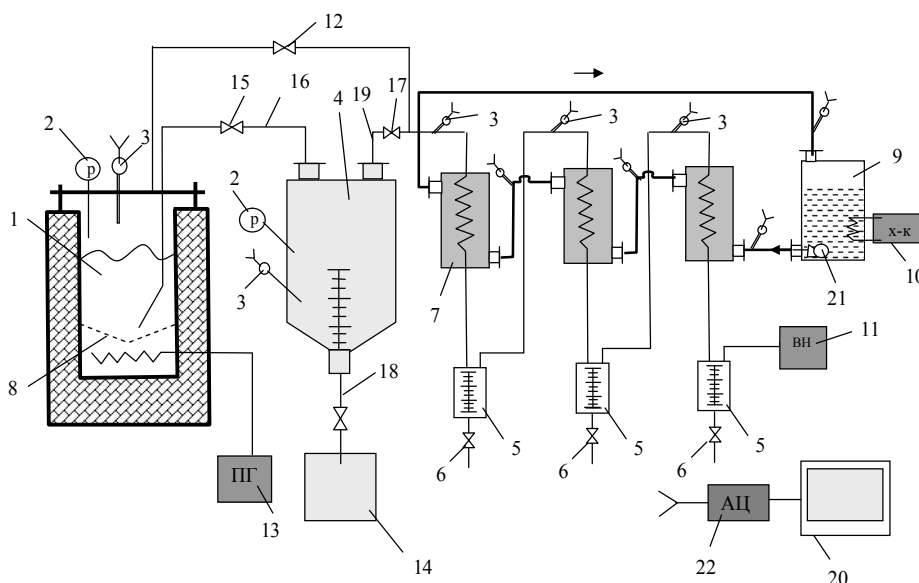


Рис. 1. Схема установки при последовательном соединении конденсаторов:

1 – реактор; 2 – манометр; 3 – датчик температуры; 4 – выдувной резервуар; 5 – тарированный сборник конденсата; 6, 12, 15, 17 – вентили; 7 – трехступенчатый поверхностный конденсатор; 8 – решетка; 9 – емкость для рассола; 10 – холодильник; 11 – вакуумный насос; 13 – парогенератор; 14 – емкость; 16 – выдувной трубопровод; 18, 19 – патрубок; 20 – монитор; 21 – центробежный насос; 22 – аналоговый цифровой

С помощью парогенератора 13 температура модельного раствора доводится до требуемого значения. Затем открывают вентили 15, 17 и проводят выгрузку варочного котла в выдувной резервуар.

Образовавшиеся пары вскипания направляются на конденсацию в трехступенчатый конденсатор смешения. Одновременно в конденсаторы подается охлаждающий рассол из емкости 9. Через определенные промежутки времени производится отбор проб.

Для имитации реального процесса в варочный котел – 1 загружалась древесная щепка и белый щелок (поставляемые с ОАО Марийский целлюлозно-бумажный комбинат) и осуществлялась варка в соответствии с технологическим регламентом.

На рис. 2 и рис. 3 представлены кинетические зависимости давления и температуры в варочном котле при сульфатной варке целлюлозы. Сопоставление опытных и расчетных данных позволяет сделать вывод об удовлетворительном описании реального процесса разработанной математической моделью. Температурная кривая процесса представлена на рисунке 3. В течении 2000сек осуществляется нагрев массы от 80⁰С до 170⁰С. Варка смеси происходит при 170⁰С в течение двух часов. Затем происходит выдувка массы в выдувной резервуар, находящийся под атмосферным давлением.

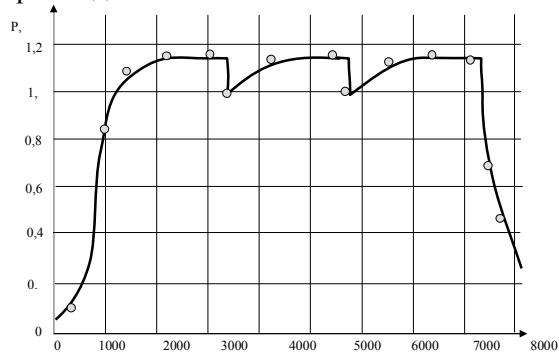


Рис. 2. Кинетические кривые давления в варочном котле

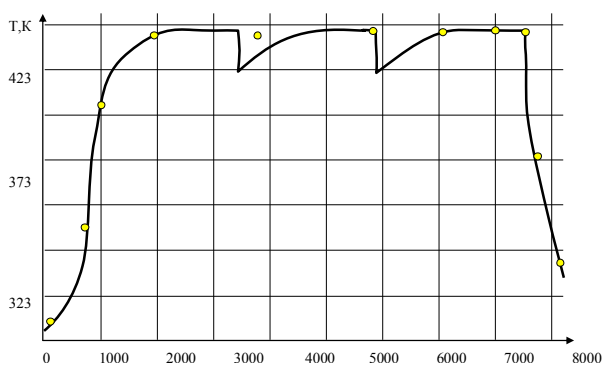


Рис. 3. Кинетическая кривая температуры процесса в варочном котле

Анализ вышеприведенных кривых показывает, что при двух проведенных сдвух происходит осцилирование давления, экспериментальные значения температуры процесса при этом практически не изменяются, это объясняется относительно малым количеством сдуваемых паров по сравнению с общей массой установки, не учитываемой математической моделью.

На рис. 4 приводятся экспериментальные и расчетные зависимости давления насыщения для чистых компонентов, находящихся в растворе черного щелока при выгрузке варочного котла. Обработка данных кривых позволяет определить коэффициенты уравнения Антуана для каждого компонента и рассчитать парциальное давление компонентов смеси при их различных концентрациях.

На рис. 5 приведена экспериментальная кинетическая зависимость интенсивности выгрузки [кг/с] варочного котла. Продолжительность выгрузки 10-40 мин. Расчетное давление выдувного резервуара 0,3 мПа. Экспериментальное снижение интенсивности выгрузки объясняется повышением давления в выдувном резервуаре в процессе выгрузки, что ведет к понижению движущей силы процесса выгрузки. Снижение давления в выдувном резервуаре можно достигнуть повышением производительности конденсаторов паров.

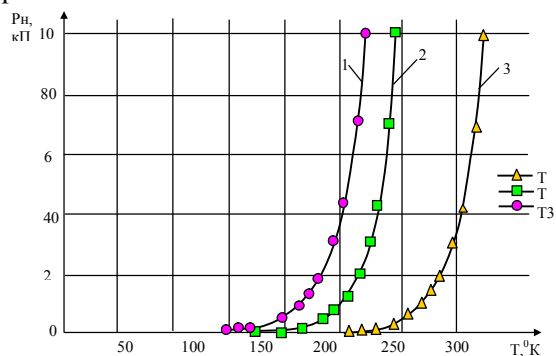


Рис. 4. Зависимость давления насыщения от температуры: 1 – метилмеркаптан, 2 – диметилсульфит, 3 – щелок

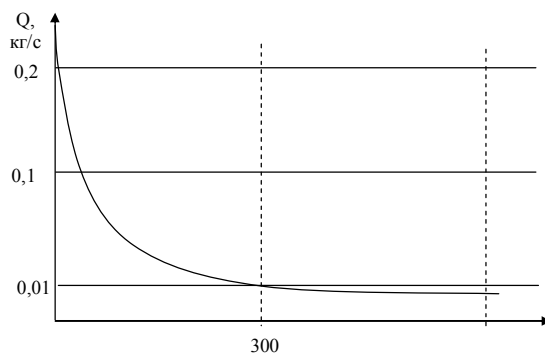


Рис. 5. Кинетическая зависимость интенсивности выгрузки варочного котла

На рис. 6 и 7 приведена зависимость производительности конденсатора от поверхности конденсации и температуры охлаждающего агента. Поверхность конденсации увеличивалась путем параллельного подключения конденсаторов. Рост производительности конденсатора с уменьшением температуры охлаждающего агента и увеличением поверхности конденсаторов отклоняется от линейного закона. Это объясняется изменением средней движущей силы процесса в процессе выгрузки варочного котла.

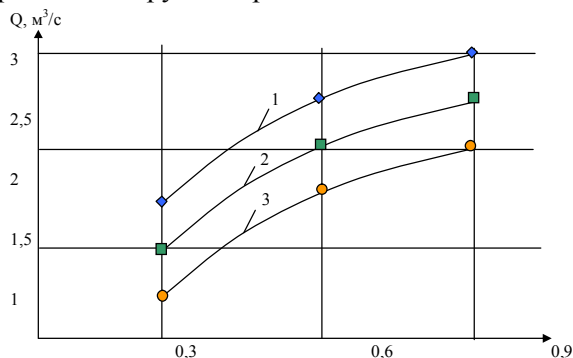


Рис. 6. Зависимость производительности конденсатора от поверхности конденсации при различных температурах охлаждающего агента: 1- 0°C; 2 – 20°C; 3- 40°C

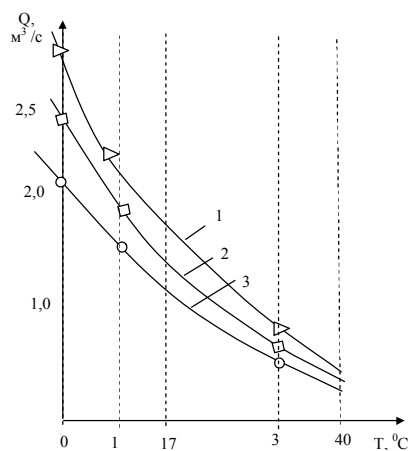


Рис. 7. Зависимость производительности конденсатора от начальной температуры охлаждающего агента в выдувном резервуаре: 1 – $F=0,9\text{m}^2$; 2 – $F=0,6\text{m}^2$; 3 – $F=0,3\text{m}^2$

На рис.8 представлены кинетические зависимости концентрации токсичных компонентов в выдувном резервуаре.

Анализ кинетических кривых изменения концентраций показывает равномерный характер их изменения. Это подтверждает принятую модель идеального смешения компонентов паровой фазы.

Кинетическая зависимость плотности паровой фазы (рис. 9) также хорошо согласуется с характером изменения давления в выдувном резервуаре.

Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования показывают, что при разгрузке варочного котла в соответствии с усовершенствованным технологическим процессом варки в выдувном резервуаре возникают избыточные давления, которые требуют внесения соответствующих поправок при расчете толщины обечаяк выдувного резервуара.

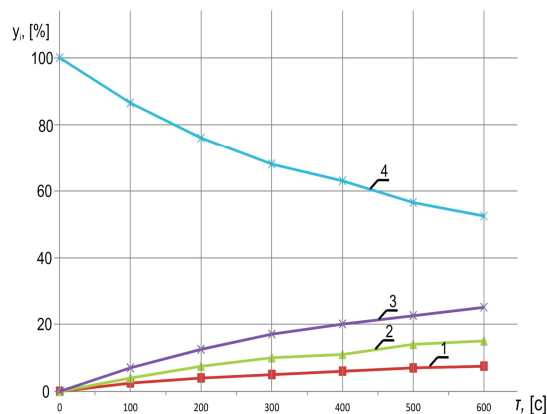


Рис. 8. Кинетическая зависимость плотности паровой фазы: 1- метилмеркаптан, 2- диметилсульфид, 3 – сероводород, 4- черный щелок

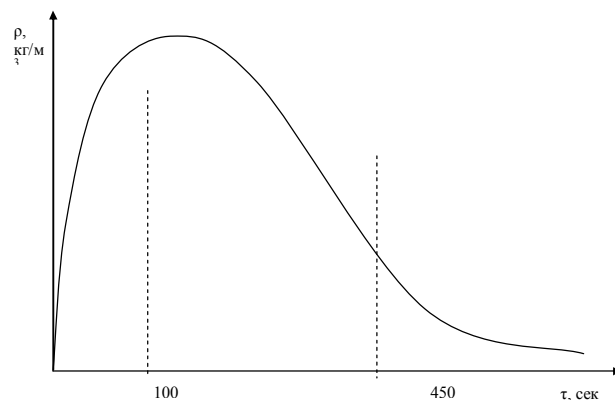


Рис. 9. Кинетическая зависимость плотности паровой фазы

Методика расчета конструктивных элементов установки сульфатной варки целлюлозы должна быть согласована с работой системы конденсации паров выдувки.

Проанализировано современное состояние системы газоочистки при сульфатной варке целлюлозы на МарЦБК и предложена схема реконструкции промышленной установки для улавливания паров с выдувного резервуара [4]. На пилотной установке для улавливания паров вскипания варочного котла при сульфатной варке целлюлозы (рис.10) была проверена усовершенствованная схема системы газоочистки при сульфатной варке целлюлозы.



Рис.10. Внешний вид пилотной установки

Анализ результатов испытаний пилотной установки подтвердил возможность промышленной реализации предложенного способа. Результаты полупромышленных испытаний показали, что разгрузка варочного котла предложенным способом позволяет не только снизить выбросы токсичных паров до ПДК, но и организовать сбор ценных компонентов.

По результатам полупромышленных испытаний и на основе инженерной методики расчета была спроектирована усовершенствованная технологическая схема процесса разгрузки варочного котла после сульфатной варки целлюлозы. На основе разработанной математической модели и результатов полупромышленного испытания были рассчитаны конструктивные и режимные параметры усовершенствованной технологической схемы.

На рис. 11 приведена принципиальная схема установки для извлечения токсичных компонентов из паров вскипания. В результате внедрения усовершенствованной технологической схемы процесса разгрузки варочного котла, обеспечивается улавливание паров диметилсульфида и метилмеркаптана. Экономическая эффективность внедрения усовершенствованной технологической схемы получается за счет величины предотвращенного экологического ущерба.

В результате внедрения усовершенствованной технологической схемы процесса разгрузки варочного котла, обеспечивается улавливание паров диметилсульфида и метилмеркаптана. Экономическая эффективность внедрения усовершенствованной технологической схемы получается за счет величины предотвращенного экологического ущерба.

В результате внедрения усовершенствованной технологической схемы процесса разгрузки варочного котла, обеспечивается улавливание паров диметилсульфида и метилмеркаптана. Экономическая эффективность внедрения усовершенствованной технологической схемы получается за счет величины предотвращенного экологического ущерба.

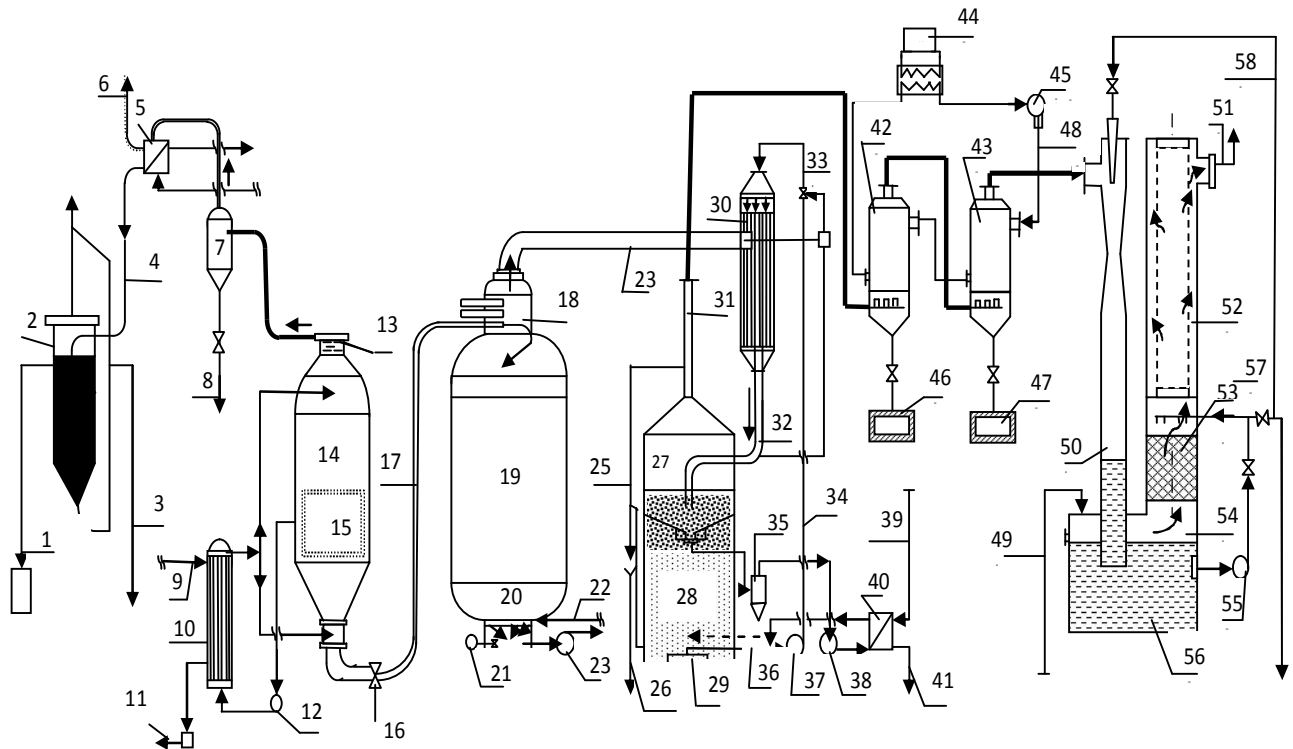


Рис. 11. Усовершенствованная схема процесса сульфатной варки целлюлозы (патенты РФ № 2425917, 2437972)

Основные обозначения:

- j – поток пара, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;
- F – поверхность испарения, м^2 ;
- Q_k – объемная производительность конденсатора, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $V_{\text{св}}$ – свободный объем аппарата, м^3 ;

- ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- τ – время, с;
- c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
- T – текущая температура, К;
- m – масса смеси, кг;
- Q_3 – загрузка компонента, $\text{кг}/\text{с}$.

Индексы:

і – компонент пара или жидкости;
ж – жидкость;
н - начальная;
п – пар;
см – смесь.

Список литературы

1. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И. Комплексная химическая переработка древесины: учеб. пособие. М.: Издательство Архангельского государственного технического университета, 2002. С. 30—50.

2. Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование деревообрабатывающих производств: учеб. пособие. М.: Изд-во КГТУ, 2000. 400 с.

3. Зиятдинова Д.Ф. Совершенствование технологий переработки древесных материалов, сопровождающихся выделением парогазовой фазы: монография. М.: Изд-во КГТУ, 2009. 144 с.

4. Способ получения сульфатной целлюлозы: пат. 2437972 Рос. Федерация. № 2010148167/12; заявл. 25.11.2010 опубл. 27.12.2011.

5. Сафин Р.Р. Анализ современного состояния лесопромышленного комплекса и перспективы его развития на базе кафедр лесотехнического профиля КГТУ / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин // Вестник Казан. технол. ун-та. 2010. № 4. С. 120-126.

6. Тимербаев Н.Ф. Совершенствование технологических процессов, сопровождающихся выбросами токсичных веществ / Н.Ф.Тимербаев, В.Н.Башкиров, Д.Ф.Зиятдинова // Тепломассообменные процессы и аппараты химической технологии: межвузовский тематический сборник научных трудов. 2002. С.68-72.

7. Ефремов А.А. Комплексная переработка древесины методом взрывного автогидролиза / А.А. Ефремов, С.А. Кузнецова, М.Т. Баловсяк, В.А. Винк, Б.Н. Кузнецов // Сибирский химический журнал. 1992. № 6. С. 36-42

8. Фенгел Д. Древесина: учеб. пособие. М.: Лесная пром-сть, 1988. 511 с.

9. Ласкеев П.Х. Производство древесной массы: учеб. пособие. М.: Лесная пром-сть, 1967. 582 с.

Д.Ф. Зиятдинова – канд.техн.наук, докторант каф. переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета, ziatdinova@rambler.ru; **М.А. Мозохин** – асп. той же кафедры.