

УДК 677.057.62

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ
РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ДАВЛЕНИЕМ
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TRANSITION PROCESSES
ON THE DEWATERING OF A FIBROUS STRUCTURE
BY DISTRIBUTED PRESSURE IN DYNAMIC LOADING MODE**

С.В. ЕРШОВ, С.О. КОЖЕВНИКОВ, Е.Н. НИКИФОРОВА, В.Б. КУЗНЕЦОВ, Е.Н. КАЛИНИН
S.V. ERSHOV, S.O. KOZHEVNIKOV, E.N. NIKIFOROVA, V.B. KUZNETSOV, E.N. KALININ

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: enkalini@gmail.com

Из практики эксплуатации текстильного отделочного оборудования известно, что каждому проценту уменьшения остаточной влажности волокнистого материала при его механическом обезвоживании соответствует существенное снижение затрат тепловой энергии при последующей сушке. Этот факт ставит тему поиска путей интенсификации процесса механического обезвоживания волокнистых материалов в валковых устройствах с соблюдением заданных динамических параметров, обеспечивающих их эксплуатационные характеристики, в ряд приоритетных направлений отраслевой науки.

From the practice of operating textile finishing equipment, it is known that each percentage reduction in the residual moisture of the fibrous material during its mechanical dehydration corresponds to a significant reduction in the cost of thermal energy during subsequent drying. This fact puts the topic of finding ways to intensify the process of mechanical dehydration of fibrous materials in roll devices in compliance with specified dynamic parameters, ensuring their operational characteristics, in a number of priority areas of industry science.

Ключевые слова: переходные процессы, распределенное давление, капиллярно-пористая структура, волокнистый материал, динамический режим нагружения, амплитудные фазочастотные характеристики, колебательный процесс, массоперенос, обезвоживание.

Keywords: transients, distributed pressure, capillary-porous structure, fibrous material, dynamic loading mode, amplitude phase-frequency characteristics, oscillatory process, mass transfer, dehydration.

Процессы механического воздействия распределенным давлением на волокнистый материал на примере валковых устройств с различными функциональными задачами широко распространены на межотраслевом уровне: в текстильной, бумагоделательной, химической и смежных отраслях промышленности.

Удаление влаги из капиллярно-пористой структуры волокнистого материала представляет собой процесс массопереноса со сложным механизмом взаимодействия жидкой фазы при создании в зоне контакта валов с волокнистым субстратом распределенного давления в объеме обрабатываемого материала. Эффективность процесса массопереноса определяется многофакторностью параметров, обеспечивающих реализацию технологических задач с учетом упруговязкоэластических свойств вспомогательных и конструкционных материалов, определяющих амплитудно-частотные характеристики основных функциональных компонентов валковой системы. А также технологических факторов воздействия на исследуемую сложную динамическую систему (температурный режим, различного уровня структурные характеристики обрабатываемого материала и др.).

Именно поэтому на этапах синтеза исследуемой системы фундаментальное значение имеет возможность получения достоверной информации об основных параметрах работы оборудования, влияющих на реализацию процесса массопереноса, протекающего в капиллярно-пористой структуре обрабатываемого волокнистого материала.

Методы проектирования рациональных валковых систем, реализующих оптимальные режимы их эксплуатации, должны основываться на теоретическом анализе и синтезе процессов, протекающих в исследуемой машинно-материальной системе – ММС (технологическая машина-волокнистый материал – вспомогательные вещества), при воздействии на структуру волокнистого субстрата.

Решение обозначенных задач определяет актуальность дальнейшего совершенствования методов проектирования валковой системы средствами методологии численного анализа и синтеза на основе компьютерного моделирования (CAD/CAM/CAE), являющимися основой для прогнозирования характеристик синтезируемой системы и принятия оптимальных научно обоснованных технических решений.

Одним из перспективных путей интенсификации процессов механического воздействия распределенным давлением на капиллярно-пористую структуру волокнистого материала является использование динамического режима нагружения валковой системы [1].

Целью исследования является совершенствование методологических основ проектирования валковых систем с созданием динамического режима распределенного давления, интенсифицирующего процесс массопереноса жидкой фазы, являющейся технологической средой в капиллярно-пористой структуре обрабатываемого материала. Или при сугубо компрессионном воздействии на волокнистую структуру без использования жидкой фазы в технологической системе. При этом оба вида технологической реализации систем с созданием динамического режима распределенного давления, помимо обеспечения качественных параметров выпускаемого продукта при реализации основных технологических задач, дают возможность обеспечить основополагающие технико-экономические показатели производства: энерго- и ресурсосбережение и снижение техногенного давления на экологическую сферу.

При создании условий воздействия распределенной нагрузкой с динамическим характером ее изменения в зоне воздействия на капиллярно-пористую структуру в потоке жидкой фазы создаются гидродинамические условия для возникновения явлений, способствующих более интенсивному процессу массопереноса в объеме структуры

волокнистого материала и тем самым повышению эффективности его обработки.

Проведенный нами сравнительный анализ влияния динамического воздействия распределенным давлением на обрабатываемый волокнистый субстрат и полученные результаты позволили оценить влияние колебаний, подводимых к активной зоне в очаге деформации обрабатываемого волокнистого материала, на массообменные процессы, протекающие в капиллярно-пористой структуре [2...4].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при изменении частоты колебаний в динамическом режиме нагружения от 0 до 50 кГц скорость фильтрации жидкой фазы через капиллярно-пористую структуру увеличивается на 11,8%, а остаточная влажность волокнистого материала уменьшается с 91 до 88%, по сравнению со статическим режимом технологического распределенного давления.

Технологические процессы, основанные на воздействии распределенным давлением на капиллярно-пористую структуру полимерного волокнистого субстрата, сопровождающиеся процессами массопереноса, базируются на периодически возникающих переходных процессах, обусловленных, как правило, нестационарными режимами взаимодействия рабочих органов технологического оборудования и обрабатываемого материала.

Амплитудные фазо-частотные характеристики колебательных возмущений опре-

деляются кинематикой рабочих органов, геометрией объекта возмущения, поглощающей и диссипативной способностями рабочих органов, с одной стороны, и упруго-вязкими характеристиками элементов, образующих динамическую систему "источник колебаний–волокнистый материал–жидкая фаза" – с другой. При этом положительное влияние динамической составляющей системы на технологическую эффективность параметров процесса может быть значительно усилено за счет сложения распределенной нагрузки, возникающей в зависимости от обобщенных динамических характеристик: неуравновешенности валов, упруговязких характеристик обрабатываемой структуры и пр.

Однако при проектировании валковых устройств и в процессе эксплуатации действующего оборудования с динамическим режимом распределенного давления следует учитывать как полезные факторы влияния переходных процессов на массоперенос, повышающие эффективность обработки волокнистого материала в жидкой среде, так и вредные воздействия колебательного процесса на технологическую систему.

Практический и научный интерес при этом представляют закономерности, характеризующие взаимосвязь геометрических, кинематических, гидравлических и динамических параметров, изменяющихся в технологической системе при обработке волокнистого материала.

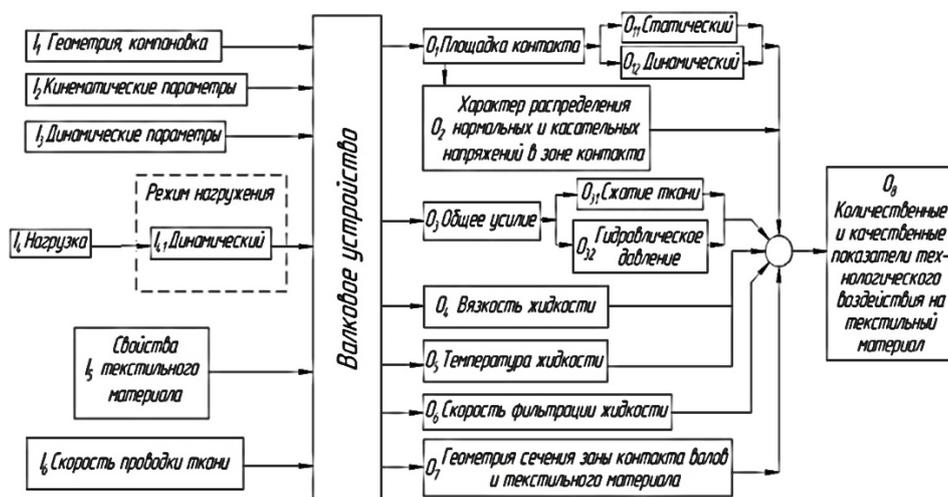


Рис. 1

Поэтому, переходя к изучению влияния динамически изменяющегося распределенного давления на капиллярно-пористую структуру волокнистого субстрата, нами была разработана концептуальная модель такого взаимодействия на примере динамической ММС с валковым устройством [5], которая воспроизводит логику ее функционирования, структуру с заданным уровнем детализации и свойств элементов, образующих эту систему (рис. 1 – концептуальная модель машинно-материальной системы, воспроизводящей процесс массопереноса при динамическом воздействии распределенным давлением на капиллярно-пористую волокнистую структуру).

Структурные свойства узлов и элементов машинного комплекса – его окончательный конструктивный вид – определяется в процессе конструирования. Сформированная же нами концептуальная модель, без усложнения и излишней на данном этапе постановки задачи детализации системы воспроизводит логику ее функционирования и дает возможность перейти к решению поставленных задач исследования на расширенном уровне.

В соответствии с разработанной концептуальной моделью нами был определен объект исследования ММС, как динамической колебательной системы и с анализом ее динамической устойчивости. В основе анализа использована разработанная нами модель упруговязкого взаимодействия валкового устройства с волокнистым материалом, в которой для описания свойств исследуемой динамической системы использованы операторные передаточные функции, в основе которых использованы преобразования Лапласа, с символическим методом анализа линейных систем, использующим оператор дифференцирования, а источники внешнего возмущения системы определены технологическими и эксплуатационными параметрами работы валкового устройства [6], [7].

Передаточные функции выражают влияние внешнего возмущающего воздействия на состояние как системы в целом, так и на ее контуры, характеризующие основные технологические свойства функционального устройства – машины.

В соответствии с представлением исследуемой системы ММС в виде механической цепи, состоящей из совокупности сопряженных между собой активных и пассивных двухполюсников [7], [8], передаточная функция $T(p)$ определяет взаимосвязь между возбуждением $e(t)$ на входе во временной t -области с реакцией $r(t)$ системы на выходе при нулевых начальных условиях (ННУ).

Источниками внешнего возмущения в рассматриваемой динамической колебательной ММС нами определены ее характеристики, определяющие технологические и эксплуатационные параметры устройства в наиболее типичных ситуациях работы валковой системы [8]:

– периодическое возмущение, обусловленное прохождением шва в соединении полотен обрабатываемого материала. Функция цепи представляет собой преобразование кинематической переменной источника возмущения $\bar{d}_4(p)$ в ускорение линейного перемещения (соответствующего нестационарному режиму движения) вала $\bar{a}_{m1}(p)$ с массой m_1 , выражаемое в виде суммы кинематических переменных элементов системы, характеризующих упругость k_2 и вязкость r_2 – в ускорение $\bar{a}_{m2}(p)$ вала с массой m_2 ; выражаемое в виде суммы кинематических переменных упругого k_5 и вязкого r_5 элементов системы, а также в относительное перемещение (ускорение) $\bar{a}_{m3}(p)$ остова устройства с массой m_3 , выражаемое в виде суммы кинематических переменных упругого k_6 и вязкого r_6 элементов системы [8]. Передаточные функции, характеризующие рассматриваемые преобразования, имеют вид:

$$T_1(p) = \left. \frac{\bar{a}_{m1}(p)}{\bar{d}_4(p)} \right|_{\text{ННУ}}, \quad T_2(p) = \left. \frac{\bar{a}_{m2}(p)}{\bar{d}_4(p)} \right|_{\text{ННУ}}, \quad T_3(p) = \left. \frac{\bar{a}_{m3}(p)}{\bar{d}_4(p)} \right|_{\text{ННУ}},$$

– периодическое возмущение, обусловленное общей неуравновешенностью валов с массами m_1 и с m_2 . Функция механической цепи, выражающая преобразование возмущения, представленного в форме кинематической переменной $\bar{d}_2(p)$ – величины дисбаланса вала (смещения центра масс вала относительно оси его вращения)

$$T_4(p) = \left. \frac{\bar{a}_{m1}(p)}{\bar{d}_2(p)} \right|_{\text{ННУ}}, \quad T_5(p) = \left. \frac{\bar{a}_{m2}(p)}{\bar{d}_5(p)} \right|_{\text{ННУ}},$$

– функция цепи $T_{61}(p)$, отражающая периодическое возмущение, характеризующее преобразование перемещения $\bar{d}_4(p)$ при прохождении шва через зону контакта валов в скорость $\bar{v}_3(p)$ деформации эластичной оболочки вала с массой m_1 или

$$T_{61}(p) = \left. \frac{\bar{v}_3(p)}{\bar{d}_4(p)} \right|_{\text{ННУ}}, \quad T_{62}(p) = \left. \frac{\bar{d}_3(p)}{\bar{d}_4(p)} \right|_{\text{ННУ}}.$$

Таким образом, основные компоненты упруговязкой модели процесса взаимодействия валкового устройства с волокнистым материалом, в которой для описания свойств исследуемой динамической системы использованы операторные передаточные функции $T_i(p)$, являющиеся коэффициентами характеристического полинома $D_\Sigma(p)$ [6]. Численные значения входных параметров при анализе характеристического уравнения $D_\Sigma(p)$ приняты нами в соответствии с реальными технологическими, конструктивными и эксплуатационными характеристиками исследуемой ММС. При этих условиях численный компьютерный эксперимент реализован применительно к десяти значениям величины динамической жесткости валов, варьируемой в интервале $k_5 = (124e5 \dots 304e5)$ Н/см.

Анализ устойчивости ММС выполнен по критерию Гурвица. К основному достоинству метода Гурвица можно отнести относительную простоту его реализации средствами компьютерной технологии с использованием процедур и команд системы

– в его ускорение $\bar{a}_{m1}(p)$ и представленного в форме кинематической переменной $\bar{d}_5(p)$ – величины дисбаланса вала – в его ускорение $\bar{a}_{m2}(p)$. Передаточные функции, характеризующие преобразования, будут иметь вид, соответственно:

$T_{62}(p)$ – в абсолютную деформацию $\bar{d}_3(p)$ эластичной оболочки вала с массой m_1 . Передаточные функции, характеризующие рассмотренные преобразования, имеют вид:

для научных и инженерных расчетов MatLab.

Соблюдение условия устойчивости ММС, представленной характеристическим полиномом, заключается в требовании отсутствия в правой координатной полуплоскости нулей и отрицательных коэффициентов для каждого конкретного сочетания численных значений входных параметров системы. В связи с этим целесообразным представляется получение картины распределения "нулей" и "полюсов" характеристического полинома на комплексной полуплоскости.

Карта расположения на комплексной плоскости нулей и полюсов характеристического полинома Гурвица представлена на рис. 2.

В соответствии с рис. 2 все конечные и все промежуточные нули и полюсы полинома Гурвица системы ММС отсутствуют в правой полуплоскости. Таким образом, система на данном этапе анализа может быть определена как устойчивая в заданном интервале значений динамической жесткости k_5 вала системы.

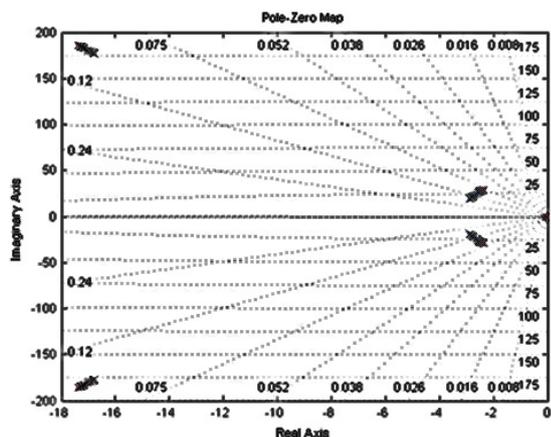


Рис. 2

Для определения устойчивости в области резонансных состояний исследуемой системы по ее амплитудно-частотным характеристикам для заданных технологических и конструктивных параметров нами построена логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика – диаграмма Боде (рис. 3) [7]. Из построенной диаграммы следует, что режим работы валкового устройства при заданных параметрах характеризуется двумя резонансными состояниями: при частоте $\omega_{кр1}=50$ рад/с и $\omega_{кр2}=130$ рад/с. Угловая рабочая скорость валов $\omega_{раб}$ равна 25 рад/с и не превышает ее критического значения, что определяет устойчивость колебательной системы и отсутствие резонансных состояний при заданных входных параметрах рабочего режима технологического процесса воздействия распределенным давлением на волокнистую капиллярно-пористую структуру.

Таким образом, заданные (принятые нами) значения динамических характеристик ММС в рассмотренном диапазоне параметров способны обеспечить устойчивость системы в докритическом скоростном режиме работы, приближаясь к резонансному состоянию при достижении максимальных значений частот вращения приводного вала, и представляют интерес при проектировании, исследованиях и эксплуатации высокоскоростных валковых систем. Это обеспечивает возможность интенсификации процесса массопереноса при обезвоживании с реализацией инфузионного процесса в армирующей волокнистой капиллярно-пористой структуре материала за

счет использования динамического воздействия на обрабатываемый объект распределенным давлением.

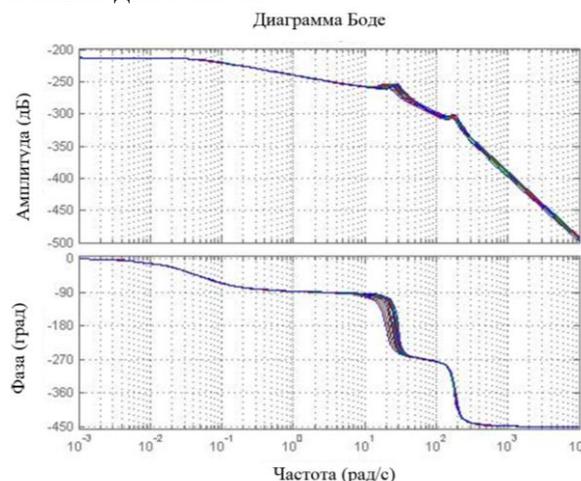


Рис. 3

Таким образом, полученные нами результаты анализа состояния динамической устойчивости ММС определяют основные концепции развития метода по обеспечению ударо-виброзащитных характеристик производственного оборудования, работающего в режиме динамического нагружения, и являются основой для дальнейшего поиска оптимальных конструктивных решений, обеспечивающих условия его эффективного функционирования при реализации технологических задач.

В Ы В О Д Ы

1. Установлено, что основным параметром, влияющим на устойчивость ММС, является динамическая жесткость валковой системы, параметры устойчивости которой должны быть определены в рассматриваемом и рекомендуемом интервале значений жесткости приводного вала при постоянстве нулевых начальных значений ее динамических параметров.

2. Из анализа разработанной нами упруговязкой модели ММС определен рабочий диапазон безрезонансных кинематических параметров валковой системы, функционирующей в динамическом режиме нагружения. Установлены два резонансных состояния динамического режима работы валкового устройства, характеризующихся критическими значениями частот $\omega_{кр1}=50$ рад/с

и $\omega_{кр2}=130$ рад/с, а рабочая окружная скорость (в соответствии со стандартом, определяющим скоростной режим технологического валкового оборудования) в большинстве текстильных технологий $\omega_{раб}=25$ рад/с – соответствует докритическому режиму его эксплуатации.

3. Установленные нами основные зависимости конструктивных параметров ММС от условий динамического режима нагружения являются основой метода оптимального проектирования принципиально новых систем, использующих механическое воздействие при динамически изменяющихся величинах распределенного давления на капиллярно-пористые структуры волокнистых материалов.

4. Результаты исследования динамической устойчивости ММС являются основой концепции метода анализа ударовиброзащитных характеристик валковых систем, работающих в динамическом режиме нагружения и базой для оптимального проектирования инновационного высокотехнологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Е.Н. Разработка методов компьютерного анализа и синтеза роторных систем текстильного отделочного оборудования: Дис....докт. техн. наук. – Иваново, 2002.
2. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Синтез ячеечной модели массообмена в процессе обезвоживания волокнистого материала распределенным давлением // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №6, С. 118...121.
3. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Компьютерный анализ ячеечной модели процесса механического обезвоживания волокнистого материала в валковой паре // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №1, С. 137...140.
4. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Компьютерная модель переходных состояний процесса массообмена в зоне контакта валковой пары // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №2, С. 117...120.
5. Ершов С.В., Калинин Е.Н. Концептуальная модель процесса механического воздействия на текстильный материал в валковом устройстве с динамическим

режимом нагружения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №7, С. 118...120.

6. Ершов С.В. Динамическое нагружение валковой пары для интенсификации процесса отжима: Дис....канд. техн. наук. – Иваново, 2013.

7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978.

8. Калинин Е.Н. Представление динамической системы "валковое устройство – текстильный материал" в форме механической цепи // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №5.

REFERENCES

1. Kalinin E.N. Razrabotka metodov komp'yuternogo analiza i sinteza rotornykh sistem tekstil'nogo otdelochnogo oborudovaniya: Dis....dokt. tekhn. nauk. – Ivanovo, 2002.
2. Ershov S.V., Kalinin E.N. Sintez yachechnoy modeli massoobmena v protsesse obezvozhivaniya voloknistogo materiala raspredelennym davleniem // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2011, №6, S. 118...121.
3. Ershov S.V., Kalinin E.N. Komp'yuternyy analiz yachechnoy modeli protsessa mekhanicheskogo obezvozhivaniya voloknistogo materiala v valkovoy pary // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2012, №1, S. 137...140.
4. Ershov S.V., Kalinin E.N. Komp'yuternaya model' perekhodnykh sostoyaniy protsessa massoobmena v zone kontakta valkovoy pary // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2012, №2, S. 117...120.
5. Ershov S.V., Kalinin E.N. Kontseptual'naya model' protsessa mekhanicheskogo vozdeystviya na tekstil'nyy material v valkovom ustroystve s dinamicheskim rezhimom nagruzheniya // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2011, №7, S. 118...120.
6. Ershov S.V. Dinamicheskoe nagruzhenie valkovoy pary dlya intensivatsii protsessa otzhima: Dis....kand. tekhn. nauk. – Ivanovo, 2013.
7. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnykh sistem. – М.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1978.
8. Kalinin E.N. Predstavlenie dinamicheskoy sistemy "valkovoje ustroystvo – tekstil'nyy material" v forme mekhanicheskoy tsepi // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2000, №5.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники. Поступила 07.04.20.