

Ц Б К

Pulp

еллюлоза

Paper

умага

Board

артон

07 [2015]

- АО «Группа «Илим». Ближайшие планы.
- От наших корреспондентов: Светогорск; Казань; Санкт-Петербург; Сыктывкар; «Пролетарий».
- Обзор Рынка: tissue, офсетная бумага.
- Статистика: июль 2015 года.
- Наука и Технологии: СПб ГТУРП; СПб ГЛТУ; ЦНИИБ; ГНЦ ЛПК.
- Оборудование: новые разработки отечественных специалистов.
- Календарь выставок '2015.
- Семинар в Санкт-Петербурге.
- В 20-й раз. Конференция Института Адама Сmith.
- По страницам журнала «Писчебумажное Дело» ...

УДК 676.056.4

ББК 35.77 я 7

Моделирование контактного деформирования тел в зонах прессования бумагоделательных машин

М. В. Колычев, инженер, Н. Н. Кокушин, д. т. н.,
СПб ГТУ РП

Параметры контактного деформирования волокнистого материала и других тел в прессовых захватах бумаго- и картоноделательных машин (БДМ и КДМ) оказывают значительное влияние на обезвоживающую способность и в целом на эффективность работы прессовых частей, показатели качества бумажного полотна и др. Основными параметрами контактного деформирования в прессовом захвате называют ширину площадки контакта валов, среднее удельное давление прессования, распределение давления по площадке контакта.

Эффективность работы прессовой части в основном может оцениваться по сухости полотна после прессовой части, по показателю расхода электроэнергии на тонну продукции и расходу одежды прессовой части в год. Повышение эффективности работы прессовой части позволяет уменьшить себестоимость производства продукции. Так, известно, что при увеличении сухости полотна после прессовой части на 1 % расход пара в сушильной части можно уменьшить на 5 %, однако, эта экономия нередко нивелируется при увеличении расхода энергии на электропривод прессов [1].

В России значительную часть парка используемых БДМ и КДМ составляют устаревшие машины, прессовые части которых не всегда работают достаточно эффективно. Это во многом связано с отсутствием методики моделирования контактного деформирования волокнистого материала, сукон и покрытий валов в прессовых частях при создании машин, в частности с отсутствием информации о влиянии прессовых покрытий различной твердости, а также сукон на основные параметры контактного деформирования.

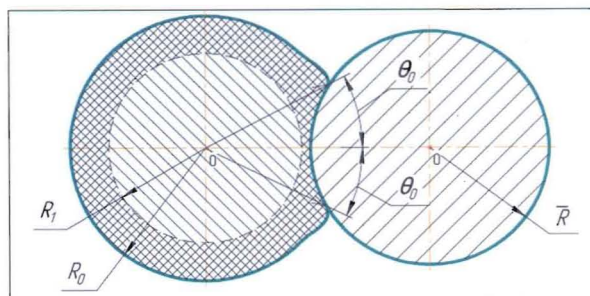


Рис. 1. Расчетная схема прессового захвата без сукна

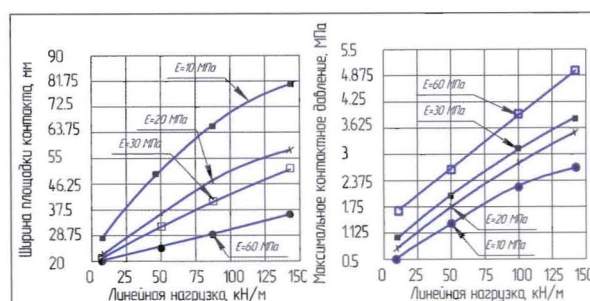


Рис. 2. Влияние модуля упругости прессовых покрытий на основные параметры контакта прессовых валов (без учета влияния сукна)

Предлагаемое исследование ставит своей задачей создание численной модели контактного деформирования покрытий прессовых валов и сукон в прессовых захватах, а также изучение влияния конструктивных параметров прессовых захватов (твердости и толщины покрытия, диаметра валов, сорта сукна) на ширину площадки контакта валов и максимальное давление в зоне контакта.

Для создания математической модели контактного деформирования элементов прессового захвата используют линейную теорию упругости и, в частности, метод сведения контактной задачи к функциональному уравнению [2].

Ниже кратко представлены результаты применения этого метода к задаче контактного взаимодействия прессовых валов как при отсутствии учета влияния сукна [2] (см. рис. 1), так и с включением в расчет прессового сукна [7].

На рис. 2 показано влияние модуля упругости E покрытия прессовых валов на ширину площадки контакта и максимальное давление в захвате валов. Исходные данные для расчетов были следующими: жесткий вал диаметром 800 мм облицован несжимаемым (коэффициент Пуассона $\mu=0,499$) покрытием толщиной 25 мм с модулем упругости $E=10, 20, 30$ и 60 МПа. Диаметр жесткого контрвала – 800 мм.

Далее на рис. 3 представлены результаты решения задачи контакта прессовых валов с учетом сукна со следующими исходными данными: прессовый вал диаметром 800 мм облицован несжимаемым (коэффициент Пуассона $\mu=0,499$) покрытием толщиной 25 мм с модулем упругости $E=10$ МПа, прессовое сукно имеет (коэффициент Пуассона $\mu=0,05, 0,2$ и 0,4) толщину 2,75 мм и модуль упругости $E=0,25, 1$ и 2 МПа. Диаметр жесткого контрвала – 800 мм [7].

Результаты решения задачи (см. рис. 3) показывают, что уже при небольших нагрузках ширина площадки контакта прессовых валов достигает значительных величин, чего не происходит на практике. Таким образом, подход к решению задачи контакта прессовых валов при наличии сукна, основанный на гипотезах линейной теории упругости, дает значительную ошибку.

Моделирование контактного деформирования тел в прессовом захвате в рамках линейной теории упругости оказалось эффективным только для достаточно твердых покрытий (полиуретан, микророк) без сукна, когда деформации тел внутри прессового захвата малы. Прессовые покрытия и сукна являются материалами, деформации которых в общем случае нельзя описать в рамках линейной теории упругости, поскольку они испытывают значительные деформации – до 50 %; при таких деформациях законы механического поведения становятся нелинейными. По этим причинам моделирование контактного деформирования тел в прессовом захвате можно вести только численно, с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и общих уравнений механики сплошных сред.

Существует целый ряд программ, реализующих МКЭ для решения задач механики сплошных сред: **Ansys, Autodesk Simulation, Code_Aster, MSC.Marc** и т. п. В основе реализации большинства расчетных комплексов МКЭ лежат вариационные принципы механики, например, принцип виртуальной работы [3]:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta e_{ij} dV = \int_V f_i^B \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS.$$

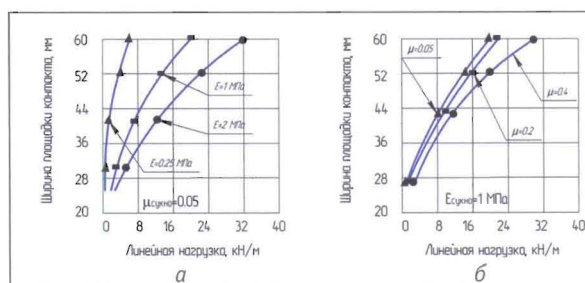


Рис. 3. Влияние упругих параметров сукна на ширину площадки контакта:

а – влияние модуля упругости; б – влияние коэффициента Пуассона сукна

В настоящей работе используется программа **Code_Aster**. Возможности **Code_Aster** позволяют рассматривать большие деформации тел, применять нелинейные материалы (резина, иглопробивные материалы), решать контактные задачи, учитывать динамику деформирования.

Для упрощения модели и увеличения скорости выполнения расчетов желательно исключить из модели некоторые малозначимые факторы. Поэтому введем некоторые гипотезы, упрощающие создание численной модели контактного деформирования тел в прессовой части:

1. Прессовые покрытия являются несжимаемыми материалами.
2. Пренебрегаем влиянием гидродинамического давления в сукне и влиянием течений на механические свойства сукна. Считаем, что объем пор в сукне так велик, что впитав всю влагу в зоне контакта, сукно остается водонасыщенным.
3. Массовые силы (силы инерции) не имеют существенного значения.
4. Считаем материалы прессовых покрытий и сукна однородными, идеально упругими или вязкоупругими. Прессовые покрытия считаем изотропными, сукна могут быть изотропными или анизотропными.
5. Считаем, что сукно не натянуто. Натяжение сукна производится по технологическим причинам (для исключения морщин и перекосов) и практически не влияет на эффективность обезвоживания в прессовой части.

Расчетная модель зоны прессования

Опуская громоздкие выражения уравнений, входящих в модель контактного взаимодействия в прессовом захвате, перечислим основные группы уравнений, входящих в нее:

- уравнения равновесия для каждого из тел системы;
- зависимости между перемещениями и деформациями;
- определяющие соотношения для упруго- или вязкоупруго-деформируемого покрытия и сукна;
- внутренние ограничения на напряженно-деформированное состояние в материалах, например, условие несжимаемости резин;

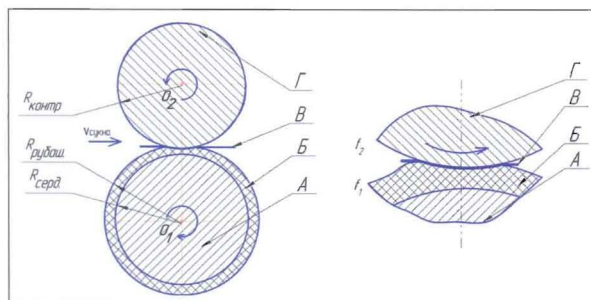


Рис. 4. Расчетная схема зоны прессования валкового пресса: А – сердечник нижнего вала; Б – покрытие нижнего вала; В – прессовое сукно (и бумага); Г – гранитный вал

– законы трения для контактных пар.

Достаточно полная расчетная схема зоны прессования валкового пресса изображена на **рис. 4**.

Для задания граничных условий все тела обозначены буквами, границы – индексами, показывающими, какую часть тела или поверхности они представляют. Нагрузки соответствуют двум случаям: статическое приложение нагрузки и квазистатическое приведение прессовых валов во вращательное движение.

Известно, что напряженное состояние покрытия (толщиной δ) обремененного вала радиусом R (a – ширина площадки контакта) эквивалентно напряженному состоянию плоской полосы при $\delta/R < 0,3$ и $a/R < 0,3$ [4, 5]. Бидерман и др. [5] показали, что в широкой плоской полосе, контактно деформируемой жестким валом, напряженное состояние является плоским деформированным состоянием. В связи с этим, для увеличения скорости расчета примем за основу плоскую дискретизацию предлагаемой математической модели. При объемном подходе к дискретизации схемы прессовой части, учитывая значительную ширину захвата, количество конечных элементов (КЭ) превышает размеры памяти компьютера при очень медленной скорости выполнения расчетов. На **рис. 5** представлено изображение плоской дискретизации модели прессового захвата.

Покровение по толщине имеет 13 слоев КЭ. Сукно помещено в зазор между валами и имеет 7 слоев КЭ по толщине. Окружное количество КЭ принималось так, чтобы в ширину площадки контакта укладывалось не менее 20-ти элементов. Это сделано для повышения точности обработки результатов.

Вся модель построена из четырехугольных КЭ типа D_PLAN для сукна и D_PLAN_INCO для резины. Контактные поверхности покрыты контактными КЭ: сукно покрыто контактными элементами для взаимодействия с верхним контрвалом и с прессовым покрытием.

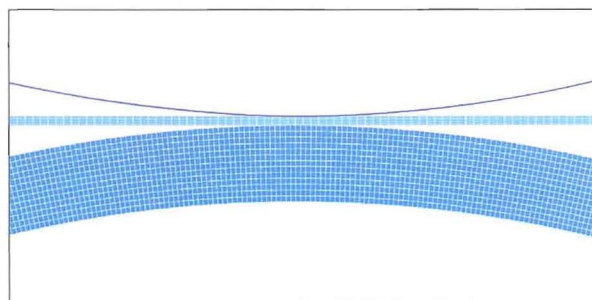


Рис. 5. Конечноэлементная дискретизация зоны контакта прессового захвата

В нашем исследовании используются результаты эксперимента [6] по растяжению образцов резин на основе бутадиен-нитрильного каучука (NBR). Образцы изготовлены из вулканизатов твердостью 60, 37 и 17 единиц по Пуссей-Джонсу (П.-Дж.). Результаты подбора параметров, выполненные в комплексе Code_Aster, следующие [6]: резина твердостью $N=60$ П.-Дж. – закон Нео-Гука, $\mu=2,68$ МПа; резина $N=37$ П.-Дж. – закон Муни-Ривлина, $C_1=1,7425$ МПа; $C_2=0,043$ МПа; резина $N=17$ П.-Дж. – закон Йоха, $C_{10}=4,14$ МПа.

Для включения прессовых сукон в модель контактного деформирования тел в прессовом захвате воспользуемся данными эксперимента из работы [7], где изучались механические свойства влажных иглопробивных прессовых сукон при деформации сжатия. Прессовые сукна представляют собой иглопробивные материалы из синтетических волокон: уралона, редона, капрона и т. д. В эксперименте было использовано три сукна: Dur-1 (вес $m=1100$ г/м², толщина $t=2,75$ мм), Ska-2 ($m=1000$ г/м², $t=3,40$ мм), Tam-3 ($m=1000$ г/м², $t=2,77$ мм). Прессовые сукна являются нелинейно-деформируемыми материалами [7], которые подвергаются значительным деформациям (до 50 %) при эксплуатации. Для описания нелинейных механических свойств сукон, подверженных большим деформациям, использован закон Огдена-Хилла первого порядка. Это определяющее соотношение предназначено для описания механического поведения волокнистых материалов, войлока и поролон.

Подбор численных значений упругих постоянных по данным экспериментов осуществлялся в комплексе Code_Aster. Результаты подбора [7] представлены в таблице.

Численные значения упругих параметров прессовых сукон

Сукно	Dur-1	Ska-2	Tam-3
Параметры	$\mu = -0,117$ МПа $\alpha = -7$ $\beta = 0,05$	$\mu = -0,117$ МПа $\alpha = -6$ $\beta = 0,05$	$\mu = -0,117$ МПа $\alpha = -8$ $\beta = 0,05$

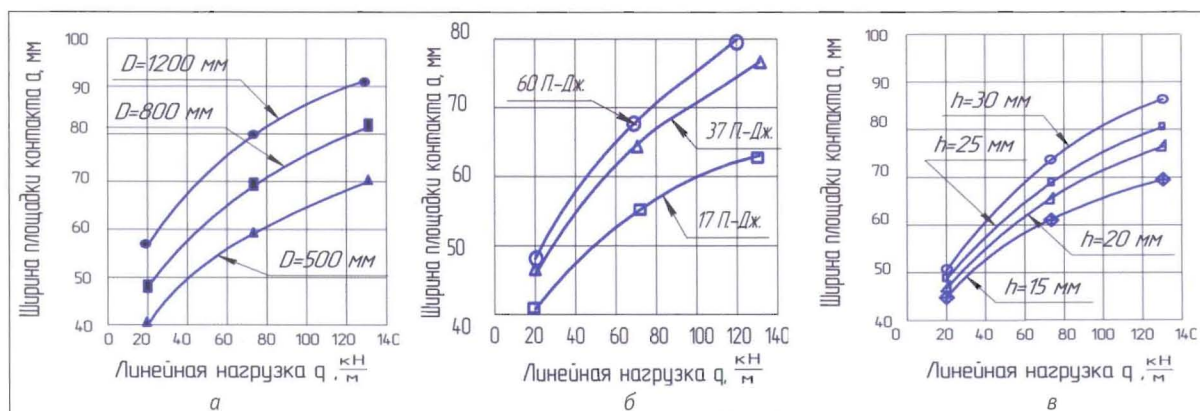


Рис. 6. Влияние параметров прессовой части на ширину площадки контакта валов: а – диаметра прессовых валов при $H=60$ П.-Дж., $h=25$ мм, сукно Dur-1; б – твердости прессового покрытия при $D=800$ мм, $h=25$ мм, сукно Dur-1; в – толщины покрытия при $H=60$ П.-Дж., $D=800$ мм, сукно Dur-1

Некоторые результаты моделирования

На рис. 6 изображены графики, полученные по изложенной методике, иллюстрирующие влияние конструктивных параметров прессовых валов на основные параметры контактного деформирования в прессовых захватах.

Влияние сукна на параметры контактного деформирования валов в прессовой части показано на рис. 7. Данные результаты показывают, что более толстые и податливые сукна обеспечивают большую ширину площадки контакта. В целом наличие сукна значительно увеличивает ширину площадки контакта прессовых валов, снижает опасность раздавливания бумажного полотна и делает более равномерным распределение контактного давления по ширине площадки контакта.

Практическое использование

Для практического применения полученных результатов необходимо разработать форму их представления, удобную для использования в инженерной практике. Такой формой представления можно считать регрессионную зависимость. При выполнении регрессионного анализа важной проблемой является планирование эксперимента – выбор оптимального числа наблюдений и расположение экспериментальных точек в пространстве факторов [8]. Причина этого – большое количество необходимых вычислительных экспериментов и большая длительность расчетов.

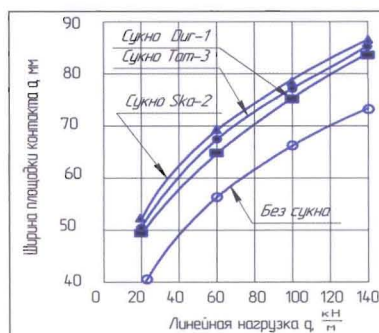


Рис. 7. Влияние сукна на ширину площадки контакта прессовых валов при твердости покрытия 60 П.-Дж.; диаметр валов $D=800$ мм, толщина покрытия $h=25$ мм

Наиболее экономичны по числу наблюдений некомпозитные планы эксперимента. Эти планы представляют собой некоторые выборки строк из полного факторного эксперимента типа 3^k . Использование этих планов упрощает и ускоряет проведение экспериментов.

Планирование эксперимента, выполнение дисперсионного и регрессионного анализа проводились с использованием программы SciLab.

В процессе численного эксперимента по разработанной модели изучалось влияние твердости покрытий (обрезинки) прессовых валов, толщины покрытий, диаметра прессовых валов и нагрузки на значения ширины площадки контакта и максимального контактного давления в прессовом захвате. Неизменяемым в процессе исследования фактором было наличие сукна Dur-1 весом 1100 г/м^2 и толщиной 2,75 мм.

Результатом анализа данных стала регрессионная зависимость для основных параметров контактного деформирования

прессовых валов. Для ширины площадки контакта валов получено регрессионное уравнение:

$$a = b_{114} \cdot x_1^4 + b_{113} \cdot x_1^3 + b_{112} \cdot x_1^2 + b_{111} \cdot x_1 + b_{222} \cdot x_2^2 + b_{221} \cdot x_2 + b_{331} \cdot x_3 + b_{442} \cdot x_4^2 + b_{441} \cdot x_4 + b_{132} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + b_{142} \cdot x_1^2 \cdot x_4 + b_{131} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{141} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{341} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_0,$$

где x_1 – твердость покрытия, П.-Дж.;

x_2 – диаметр валов, м;

x_3 – толщина покрытия, мм;

x_4 – линейная нагрузка в прессовом захвате, кН/м.

Коэффициенты регрессионного уравнения имеют следующие значения:

$$b_{114} = -3,724 \cdot 10^{-8}; b_{113} = 2,857 \cdot 10^{-5}; b_{112} = -6,326 \cdot 10^{-3}; b_{111} = 0,325; b_{222} = -10,75; b_{221} = 44,0958; b_{331} = -0,0409; b_{442} = -1,398 \cdot 10^{-3}; b_{441} = 0,2661; b_{132} = -2,962 \cdot 10^{-5}; b_{142} = -5,9 \cdot 10^{-6}; b_{131} = 0,011361; b_{141} = 2,26 \cdot 10^{-3}; b_{341} = 5,47 \cdot 10^{-3}; b_0 = -4,7675.$$

Коэффициент множественной корреляции для этой регрессионной зависимости равен $R=0,99161$. Статистика Фишера для этого уравнения равна $F=223$, что больше критического значения $F_{\text{крит}}=2,494$ [8]. Это свидетельствует о том, что данная регрессионная модель значима и адекватно описывает исходные данные.

Для максимального контактного давления также получено регрессионное уравнение:

$$p = b_{114} \cdot x_1^4 + b_{113} \cdot x_1^3 + b_{112} \cdot x_1^2 + b_{111} \cdot x_1 + b_{222} \cdot x_2^2 + b_{221} \cdot x_2 + b_{332} \cdot x_3^2 + b_{331} \cdot x_3 + b_{441} \cdot x_4 + b_{132} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + b_{142} \cdot x_1^2 \cdot x_4 + b_{131} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{141} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{341} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_0.$$

Коэффициенты регрессионного уравнения здесь имеют следующие значения:

$$b_{114} = 4,12 \cdot 10^{-9}; b_{113} = -3,166 \cdot 10^{-6}; b_{112} = 7,2 \cdot 10^{-4}; b_{111} = -0,0435; b_{222} = 0,113; b_{221} = -0,463; b_{332} = 1,8 \cdot 10^{-3}; b_{331} = -0,069; b_{441} = 0,0482; b_{142} = 4,85 \cdot 10^{-7}; b_{141} = -1,862 \cdot 10^{-4}; b_{242} = 3 \cdot 10^{-3}; b_{241} = -0,0123; b_{341} = -6,1 \cdot 10^{-4}; b_0 = 2,0155.$$

Коэффициент множественной корреляции для этой регрессионной зависимости равен $R=0,99135$. Статистика Фишера для этого уравнения равна $F=216,5$, что больше критического значения $F_{\text{крит}}=2,494$ [8]. Это также свидетельствует о том, что регрессионная модель значима и адекватно описывает исходные данные.

На основании представленных регрессионных зависимостей возможно прогнозирование основных параметров контакта прессовых валов при наличии сукна. Ошибка при использовании представленных выше зависимостей не превышает 3 % от исходных данных.

Использование данной модели позволит подбирать основные конструктивные характеристики прессовой части на этапе проектирования, оптимизировать подбор прессовых покрытий и режима прессования полотна, а также увеличить сухость после прессования и повысить качество готовой продукции.

Список литературы

1. Бумагоделательные и картоноделательные машины / Под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.
2. Колычев М. В., Коновалов А. Б. Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта жесткого и обрезаемого валов. // Машины, агрегаты и приборы: Бытовое обслуживание и коммунальное хозяйство: тез. докл. II Всеросс. конф., Санкт-Петербург, 17-18 ноября 2005. С. 193-199.
3. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976.
4. Бидерман В. Л., Гоман А. М. Приближенное решение контактной задачи для слоя ограниченной ширины из несжимаемого материала. // Известия ВУЗов: Машиностроение, 1973, № 7, С. 15-20.
5. Бидерман В. Л., Гоман А. М., Сухова Н. А. Об одной смешанной задаче теории упругости для полосы из несжимаемого материала. // Известия АН СССР: МТТ, 1970, № 6, стр. 154.
6. Колычев М.В. Исследование деформационных свойств покрытий прессовых валов бумагоделательных машин // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. науч. трудов / СПбГТУРП. – СПб., 2015, С. 42-46.
7. Колычев М. ., Кокушин Н. Н. Исследование деформационных свойств прессовых сукон бумагоделательных машин. // Целлюлоза. Бумага. Картон. , № 8, 2015.
8. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981, 184 стр.

Читайте в следующем номере!

Итоги работы российских предприятий в августе 2015 года.