

# ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК 631 371:621

## ПЛОСКИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ В УСТРОЙСТВАХ МОЙКИ ШЕРСТИ

Черенков А. Д., Косулина Н. Г.

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка*

*Для мойки шерсти в непрерывном цикле предложена конструкция плоского гидродинамического излучателя с направленным потоком жидкости и эффективным превращением энергии движущейся жидкости в энергию акустических и ультразвуковых колебаний для озвучения значительного объема жидкости. Проведены исследования и получены основные характеристики плоского гидродинамического излучателя для процессов непрерывной мойки шерсти. Из полученных результатов следует, что интенсивность звуковых колебаний почти линейно зависит от давления насоса. Исследованы геометрические параметры одиночного стержня в зависимости от его физических характеристик и требуемой частоты колебаний. Определены параметры периодической решетки колеблющихся стержней и найдена их связь с частотой звуковых колебаний. Представлена зависимость интенсивности ультразвуковых колебаний от толщины слоя обрабатываемой шерсти, частоты колебаний и их амплитуды. Найдено оптимальное соотношение между частотой колебаний, геометрическими и физическими параметрами излучающей решетки с точки зрения максимального моющего воздействия на шерсть.*

**Постановка проблемы.** Одной из традиционных отраслей легкой промышленности является обработка шерсти, для обеспечения которой сырьем сельское хозяйство занимается разведением и выращиванием овец. Повышение конкурентоспособности предприятий, занимающихся производством изделий из шерсти, невозможно без снижения себестоимости шерстного волокна и повышения его качества, что требует коренного повышения технического и технологического уровня фабрик первичной обработки шерсти. Особенно актуальными вопросами при этом являются вопросы сокращения потребления воды и предотвращения загрязнения окружающей среды сточными водами указанных фабрик. Если этот вопрос не будет решен в ближайшем будущем, то производство шерсти может быть закрыто по требованиям экологов. Применение акустических колебаний при мойке шерсти позволит разработать новую технологию первичной обработки шерсти, отличающейся от традиционной значительным уменьшением потребления энергоресурсов и воды, уменьшенными габаритами оборудования, повышением качества мытой шерсти и обеззараживанием ее и сточных вод. Целью и задачей первичной обработки шерсти является удаление из нее почвенных и навозных загрязнений, растительных примесей и жиропота с максимальным сохранением природных свойств шерстного волокна и получение качественного сырья для текстильной промышленности. Кроме приведенных загрязнений шерсть может быть загрязнена пестицидами, которые используются для защиты овец от паразитов (клещи, чесотка, вши, мясная муха и др.) и попадают в шерсть при купании и инъекции животных [1-3]. Основная часть загрязнений из немойтой шерсти удаляется на мочечных машинах, которые являются главными аппаратами процесса первичной обработки шерсти. Известно два принципа конструктивного устройства мочечных машин: ванно-мочечный и волоконно-транспортный. Первый принцип требует обязательного соблюдения мо-

дуля ванны и поддержания определенного уровня жидкости в барках, при втором принципе, в зависимости от технологической схемы, не требуется соблюдения этих условий. Наиболее эффективным способом снижения затрат на промывку является повышение производительности мочечно-сушильного агрегата. Повышение производительности агрегата на 20% дает снижение издержек производства до 12% [4].

В соответствии с теорией механизма общего удаления загрязнений в процессе промывки [5] сам процесс включает в себя 5 этапов: пенетрация воды и моющих средств в жир, с последующим быстрым набуханием жира и протеинового слоя; образование шариков жира внутри набухшей массы; удаление легкоудаляемых загрязнений, которые непрочно удерживаются на поверхности волокна; частичное удаление трудноудаляемых загрязнений, в том числе и набухших протеиновых загрязнений, которые прилипли к поверхности волокна вместе с жиром и грязью; образование моющим средством суспензии удаленных загрязнений и предотвращение их переложения на поверхность волокна.

Для промывки шерсти используются мочечные машины разных конструкций [1]. Сходство между ними состоит в делении машины на барки и обязательной установкой между ними пары отжимных валков.

Различия в процессе мойки заключаются в способах транспортировки шерсти по барке и пропускании моющего раствора через слой шерсти. В мочечных машинах с грабельными и боронными механизмами невозможно получить направленное движение раствора через слой шерсти и поэтому эффективность промывки от воздействия этих органов незначительная.

Преимуществом мочечной машины фирмы "Фляйснер" является целенаправленное движение моющей жидкости через слой шерсти, однако при увеличении концентрации загрязнений в барках это

приводит к увеличению загрязнения шерсти моющим раствором, поскольку слой шерсти одновременно является фильтром для раствора. В связи с этим возникает необходимость увеличения противотока, что в свою очередь приводит к снижению концентрации жира в стоках и соответственно к снижению процента его извлечения. Кроме того, в рабочей зоне жидкости (под ложным дном) часть тяжелых частиц загрязнений не могут выпасть под ложное дно из-за встречного потока жидкости.

На известных агрегатах производства Англии, Японии, Новой Зеландии, Германии нормально промывается шерсть с выходом менее 60% и содержащая мало трудноудаляемых загрязнений, например, австралийская и новозеландская шерсть. Практический опыт показывает, что для хорошей промывки тонкой шерсти из таких стран как Россия, Украина, Казахстан на этих агрегатах приходится снижать нагрузку на 30 - 40%.

Значительное влияние на работу моечных машин имеет работа отжимных валов. В отжимных валах происходит отрыв значительной части шариков жира и загрязнений от поверхности волокна и удаление раствора из слоя шерсти. Шерсть, поступающая в отжимные валы, содержит химически связанную влагу (влагу набухания), проникшую в волокно, и свободную (капиллярную) влагу, находящуюся на поверхности волокна и между волокнами. Технологически важно, чтобы к валам вместе с шерстью не поступала моечная жидкость для того, чтобы отжимаемая валами жидкость стекала свободно по поверхности нижнего вала со стороны входа шерсти.

Проведенный анализ показал, что существующие технологии и оборудование процессов предварительной обработки шерсти оказывают частичное отрицательное воздействие, как на саму шерсть, так и на окружающую среду, что требует новых подходов в решении этой задачи.

**Цель статьи:** исследование плоского гидродинамического излучателя в устройствах мойки шерсти.

**Основной материал исследования.** Для мойки шерсти в непрерывном цикле предложена конструкция плоского гидродинамического излучателя с направленным потоком жидкости и эффективным превращением энергии движущейся жидкости в энергию акустических и ультразвуковых колебаний для озвучения значительного объема жидкости. Данный гидродинамический излучатель представляет собой устройство, состоящее из корпуса прямоугольного сечения с квадратной трубой внутри, трех конических сходящихся насадок, подсоединенных к этой трубе, со щелевыми выходными отверстиями. Их более длинная ось перпендикулярна оси стержней, находящихся в нижней части корпуса, и полученных путем выполнения прорезей в дне (рис. 1).

Струи моющего раствора вытекают из щелевых отверстий конических сходящихся насадок с большой скоростью и соответственно с развитой турбулентностью и, попадая на стержни плоского гидродинамического излучателя, осуществляют динамическое влияние на них, принуждая осуществлять колебания с большой интенсивностью. Это приводит к генерированию интенсивных звуковых и ультразвуковых ко-

лебаний. Струи жидкости, проходя через щель излучателя, в результате увеличивают свою турбулентность, что приводит к возникновению кавитационных процессов со значительной пульсацией скорости и давления, которые в свою очередь также генерирует звуковые и ультразвуковые колебания. Эти колебания со значительной пульсацией давления и скорости движения моющего раствора способствуют интенсивному отделению загрязнений от шерсти. Струя моющего раствора жидкости, которая выходит через щель плоского гидродинамического излучателя, выносит загрязнение в объем моющей барки, мешая вторичному оседанию загрязнений на шерсть. Кроме мойки шерсти также происходит обеззараживание ее и моющего раствора за счет акустических и ультразвуковых колебаний без использования химических веществ, что сохраняет природные свойства шерсти.

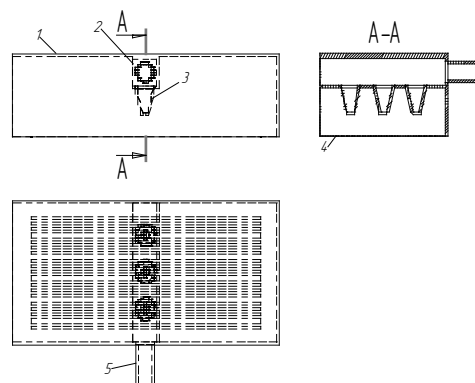


Рисунок 1 – Конструкция плоского гидродинамического излучателя:

- 1 – корпус прямоугольного сечения;
- 2 – квадратная труба;
- 3 – конические сходящиеся насадки;
- 4 – стержни;
- 5 – патрубков.

Данная конструкция способствует повышению качества промывки шерсти и уменьшению энергозатрат на технологический процесс ее мойки, что достигается за счет создания интенсивного направленного звукового поля и скоростных направленных потоков моющего раствора.

Для теоретического исследования плоского гидродинамического звукового излучателя рассматривается модель периодической решетки с периодом  $d$ , образованная конечным числом упругих стержней прямоугольного поперечного сечения в нижней части излучателя (рис. 1). Предполагается, что концы стержней решетки жестко закреплены, и каждый стержень решетки может совершать только гармонические упругие изгибные колебания, зависящие от одной пространственной переменной вдоль оси стержня (т.е. рассматривается одномерная модель колебаний) [6].

Расчет физических и геометрических параметров такого типа гидродинамических излучателей проводится в три этапа. На первом этапе рассматриваются гармонические изгибные колебания одиночного стержня с жестко закрепленными концами. На втором этапе исследуется задача о взаимодействии звукового

поля с решеткой стержней. При этом естественно предположить, что система стержней может быть заменена бесконечной периодической системой. На третьем этапе исследуется задача о взаимодействии звукового поля, которое возбуждается решеткой упругих стержней, со слоем шерсти.

Для решения задачи первого этапа воспользуемся подходом, изложенным в [7]. Предполагая, что деформации малы и длина стержня при этих деформациях не меняется, получаем функцию  $u(x, t)$ , которая описывает смещения стержня вдоль его оси  $OX$ . Данные смещения при изгибных колебаниях нормальны к нижней части плоского гидродинамического излучателя. Функция  $u(x, t)$  должна удовлетворять уравнению поперечных колебаний стержня следующего вида:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \bar{a}^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

где  $\bar{a}^2 = EI / \rho_c S$ ;

$E$  – модуль упругости материала стержня;

$\rho_c$  – плотность материала стержня;

$S = bh$  – площадь прямоугольного поперечного сечения стержня;

$I$  – параметр, рассчитываемый по формуле:

$$I = b \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz = \frac{bh^3}{12}.$$

Общее решение уравнения (1) можно представить в виде [7]:

$$u(x, \lambda) = Ach\mu x + Bsh\mu x + C \cos \mu x + D \sin \mu x, \quad (2)$$

где  $\lambda = \omega^2 / \bar{a}^2$ ;

$\mu = \lambda^{1/4}$ ;

$\omega$  – круговая частота колебаний;

$A, B, C, D$  – произвольные константы.

Используя нулевые начальные и граничные условия, получаем трансцендентное уравнение для вычисления собственных значений  $\lambda$ :

$$1 - \operatorname{ch}(\lambda^{1/4} l) \cos(\lambda^{1/4} l) = 0, \quad (3)$$

где  $l$  – длина стержня.

Собственные значения имеют вид:  $\lambda_1 = (\mu_1 / l)^4$ ,

$\lambda_2 = (\mu_2 / l)^4$ ,  $\lambda_3 = (\mu_3 / l)^4$  и т.д. При больших значениях индекса  $n$ , для этих корней справедлива приближенная формула:

$$\lambda_n \cong \left[ \frac{\pi}{2l} (2n+1) \right]^4, \quad n \geq 3.$$

В результате собственные частоты  $f_n$  изгибных гармонических колебаний упругого стержня с жестко

закрепленными концами могут быть вычислены по формуле:

$$f_n = \frac{\bar{a} \mu_n^2}{2 \pi l^2}.$$

Отсюда соотношение, связывающее длину  $l$  и толщину  $h$  стержня, приобретает вид:

$$l = \sqrt{h} \frac{\mu_n}{2 \sqrt{\pi f}} \left( \frac{E}{3 \rho_c} \right)^{1/4}. \quad (5)$$

Полученная формула (5) позволяет для заданной частоты колебаний и заданных физических параметров материала стержня рассчитать его оптимальные геометрические параметры с точки зрения эффективности возбуждения колебаний.

При переходе к задаче второго этапа об излучении звуковых волн решеткой упругих стержней прямоугольного поперечного сечения, предположим, что длина волны излучаемых волн значительно больше расстояния между стержнями решетки, а колебательная скорость поверхностей стержней одинакова, и зависит от времени по гармоническому закону  $e^{-j\omega t}$ . Кроме того, колебательная скорость направлена перпендикулярно поверхностям стержней (ось  $z$ ), определяется производной по времени от функции, описывающей собственные упругие изгибные колебания стержней, и может быть рассчитана по формуле:

$$V_0 = -j \omega \frac{1}{l} \int_0^l u(x, \omega) dx, \quad (6)$$

где функция  $u$  имеет вид (2) и является собственной функцией задачи (1).

То есть, колебательная скорость для гармонических колебаний пропорциональна величине смещения поверхности стержня усредненной по его длине, а частота  $f = \omega / 2\pi$  совпадает с одной из собственных частот изгибных колебаний стержня и может быть рассчитана по формуле (4).

Поскольку длина волны значительно больше расстояния между стержнями, то заменим конечную систему стержней бесконечной периодической решеткой с некоторым периодом  $d$  и пренебрежем толщиной стержней. В таком случае можно ограничиться двумерной задачей ( $\frac{\partial}{\partial x} \equiv 0$ ,  $x$  – переменная вдоль осей стержней). Рассматриваемая периодическая решетка находится в жидкости с равновесными значениями скорости распространения звука  $c_0$ , плотностью  $\rho_0$  и коэффициентом вязкости  $\eta_0$ . При сделанных предположениях, основное уравнение звуковых колебаний имеет следующий вид [8]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial u}{\partial t} - c_0^{-2} \Delta u = 0, \quad (7)$$

где коэффициент затухания  $\gamma$  для гармонических колебаний может быть вычислен в соответствии с выражением:

$$\gamma \cong \frac{4 \omega^2 \eta_0}{3 c_0^2 \rho_0}.$$

Решение задачи (7) ищется методом частичных областей. С этой целью функция  $u$  разлагается в ряды Фурье по переменной  $y$  (ось  $y$  лежит в плоскости стержней и на ней расположены их периоды) в полупространстве  $z > 0$  и полупространстве  $z < 0$ . В этом случае функция  $u$  в полупространствах  $z > 0$  ( $z < 0$ ) является суперпозицией плоских волн расходящихся от решетки при  $z \rightarrow \pm \infty$ .

Чтобы найти коэффициенты рядов Фурье  $a_n$  необходимо потребовать непрерывность потенциальной функции  $u$  и ее производной  $\partial u / \partial z$  на плоскости  $z = 0$  при  $|y + id| < \frac{b}{2}$ ,  $i = 0, \pm 1, \dots$  (т. е. на щелях решетки). Здесь  $i$  – номер стержня.

Поскольку, для рассматриваемой задачи длина волны излучения значительно превосходит период решетки, т.е.  $|kd/2\pi| \sim 10^{-2}$ , то используя метод последовательных приближений и ограничиваясь нулевым приближением можно получить явные выражения для амплитуд  $a_n$ :

$$a_0 = -\frac{j p_0 W_0 V_0 d}{2\pi (1 - j W_0 \kappa)},$$

$$a_n = \frac{d V_{n-1}^{-1}}{2\pi n} p_0 V_0 \left( -j + \frac{W_0 \kappa}{1 - j W_0 \kappa} \right), \quad (8)$$

где  $\kappa = kd/2\pi$ ;

$k = \sqrt{\omega(\omega + j\gamma)}/c_0$  – волновое число;

$p_0$  – стационарное давление в жидкости;

$$W_0 = \ln \frac{1 + \cos \frac{\pi b}{d}}{2} = 2 \ln \left| \cos \frac{\pi b}{2d} \right|.$$

Как легко видеть, амплитуды  $a_n$  пропорциональны колебательной скорости  $V_0$  поверхностей стержней решетки и сложным образом зависят от геометрических параметров, а именно отношения ширины стержней к периоду решетки  $b/d$ .

Проведенные расчеты показали, что пульсации скорости потока жидкости  $V_z$ , а также давления  $p - p_0$  могут быть определены из выражений:

$$V_z \cong V_0 \frac{\kappa W_0}{1 - j W_0 \kappa} e^{jkz}, \quad (9)$$

$$p - p_0 \cong \frac{(j\gamma - \omega) \rho_0 W_0 V_0 d}{2\pi (1 - j W_0 \kappa)} e^{jkz}. \quad (10)$$

Как видно из (9), (10) основной фактор, оказывающий влияние на поля скоростей и давлений, имеет следующий вид:

$$\frac{\kappa W_0}{1 - j W_0 \kappa}. \quad (11)$$

Проанализируем, как зависит величина (11) от частотного параметра  $\kappa = kd/2\pi$  и геометрического параметра  $b/d$ . Будем предполагать, что потери в жидкости, где находится решетка стержней, малы, т.е.  $\gamma/\omega \ll 1$ , тогда волновое число  $k = \sqrt{\omega(\omega + i\gamma)}/c_0$  можно представить в виде:

$$k \approx \frac{\omega}{c_0} (1 + i0,5\nu),$$

где  $\nu = \gamma/\omega$ .

Максимального значения модуль фактора (11) достигает при выполнении условия:

$$1 + 0,5W_0 \kappa_0 \nu = 0. \quad (12)$$

Следовательно, при выполнении условия (12), скорость и давление в излучаемой волне максимальны. Отсюда же следует, что оптимальное соотношение между шириной стержня и периодом решетки выглядит как:

$$\frac{b}{d} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[ \exp \left( -\frac{3c_0^3 \rho_0}{8d f_n^2 \eta_0 \pi} \right) \right], \quad (13)$$

$$\text{где } f_n = \frac{\mu_n^2 h}{4\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho_c}},$$

$$\mu_1 = 4,735, \quad \mu_2 = 7,857, \quad \mu_3 = 10,996.$$

Таким образом, получена формула, позволяющая рассчитывать оптимальные геометрические параметры решетки стержней, моделирующей гидродинамический излучатель.

Повышение рентабельности отрасли легкой промышленности, связанной с обработкой и использованием шерсти, требует новых технологий и средств для ее первичной обработки. Существующие в настоящий момент в различных странах комплексы показывают неплохие результаты, однако и имеют целый ряд недостатков. В частности, выход качественной и промытой шерсти из таких агрегатов далек от 100%. Кроме того, использование моющих средств приводит к дополнительному загрязнению окружающей среды.

В качестве альтернативы существующим методам предложено использовать ультразвуковые колебания, воздействующие на слой шерсти, что позволяет не

только уменьшить использование моющих веществ, но и повысить обеззараживание как самой шерсти, так и сточных вод.

С этой целью предложена конструкция плоского гидродинамического излучателя с направленным потоком жидкости и эффективным превращением ее энергии в энергию акустических и ультразвуковых колебаний. Источником звуковых колебаний является система стержней, расположенных в дне излучателя и возбуждаемых потоком жидкости, падающим на них.

Для определения оптимальных параметров данного излучателя с точки зрения наибольшего воздействия на обрабатываемую шерсть рассмотрена цепочка задач: звуковая волна одиночного стержня, волна от периодической системы стержней и, наконец, определение параметров этой системы с точки зрения отдачи максимальной энергии колебаний в слой шерсти для максимальной ее очистки.

Исследование колебаний одиночного стержня дало возможность определить его геометрические и физические параметры для получения нужной частоты ультразвука. Переход от одиночного колеблющегося стержня к периодической решетке даёт возможность вычислить характеристики ансамбля колеблющихся стержней с учетом их периода и взаимодействия друг с другом. Полученный результат даёт возможность перейти к изучению взаимодействия энергии колеблющейся жидкости со слоем шерсти в процессе ее мойки.

**Выводы:** 1. Для первичной обработки шерсти в непрерывном потоке водными растворами следует использовать плоские гидродинамические преобразователи акустических колебаний. 2. Для теоретических исследований по определению параметров гидродинамического плоского излучателя акустических колебаний необходимо рассматривать модель, в которой система стержней заменена на бесконечную периодическую систему. 3. Для определения параметров излучателя и анализа взаимодействия акустических колебаний с шерстью необходимо использовать выражение (13).

#### Список использованных источников

1. Рогачев Н. Шерсти. Первичная обработка и рынок / Рогачев Н., Васильева Л., Тимошенко Н.. Москва: ВНИИП РАСХН, 2000. – 600 с.
2. Мороз В. От травы к шерсти / Мороз В. Москва: Колос, 1997. – 303 с.
3. Рогачев Н. (1980). Некоторые вопросы первичной обработки шерсти / Рогачев Н. – Москва: Легкая индустрия, 1980. – 182 с.
4. Christoe J. Objectives of the Scouring Process / Christoe J., *Symp. CSIRO Wool Scouring and Worsted Carding*, 1986. – P. 3 – 7.
5. Bateup B. "Optimization of the Aqueous Scouring Process", *Symp. CSIRO Wool Scouring and Worsted Carding*, 1986. – 16 p.
6. Мороз О. (2009). Математическая модель плоского гидродинамического излучателя и определение геометрических размеров его стержней / Мороз О. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харьков, ХНТУСГ, № 9 (67). С. 21 – 26.

7. Тихонов А. Уравнения математической физики / Тихонов А., Самарский А. – Москва: Наука, 1972. – 735 с.

8. Скучик Е. Основы акустики. / Скучик Е. Москва: Мир, том. 1, 1976. – 520 с.

#### Анотація

### ПЛОСКИЙ ГИДРОДИНАМИЧНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ В ПРИСТРОЯХ МИЙКИ ВОВНИ

Черенков О. Д., Косуліна Н. Г.

*Для мийки вовни в неперервному циклі запропонована конструкція плоского гідродинамічного випромінювача з напрямленим потоком рідини та ефективним перетворенням енергії рухомої рідини в енергію акустичних та ультразвукових коливань для озвучування значного об'єму рідини. Проведені випробування то отримані основні характеристики плоского гідродинамічного випромінювача для процесів неперервної мийки вовни. З отриманих результатів видно, що інтенсивність звукових коливань майже лінійно залежить від тиску насоса. Досліджені геометричні параметри одиночного стержня в залежності від його фізичних характеристик та необхідної частоти коливань. Представлена залежність інтенсивності ультразвукових коливань від товщі шару оброблюваної вовни, частоти коливань та їх амплітуди. Знайдено оптимальне відношення між частотою коливань, геометричними та фізичними параметрами випромінювальної решітки з точки зору максимального мийного впливу на вовну.*

#### Abstract

### HYDRODYNAMIC FLAT EMITTER IN THE DEVICES OF THE WASHING OF WOOL

Cherenkov O., Kosulina N.

*To wash wool in a continuous loop the design of flat hydrodynamic emitter with a directional flow of fluid and effective transformation of energy of moving fluid into the energy of acoustic and ultrasonic vibrations to insonify a significant amount of liquid. Conducted research and derived the basic hydrodynamic characteristics of a flat emitter for continuous washing processes of wool. From the obtained results it follows that the intensity of the acoustic oscillations is almost linearly dependent on the pump pressure. Investigated geometrical parameters of a single rod, depending on its physical characteristics and the desired frequency of oscillation. The parameters of a periodic lattice of oscillating rods and found their relationship with the frequency of sound vibrations. Presents the dependence of intensity of ultrasonic vibrations on the thickness of the layer of the treated wool, the frequency of oscillations and their amplitude. Optimal relationship between the oscillation frequency, geometric and physical parameters of the emitting lattice from the point of view of maximum detergent effect on the wool.*