ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЧВ

Золотаревская Д.И.

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, e-mail: zolot@gagarinclub.ru

Проблема сохранения и повышения плодородия почв является в настоящее время одной из наиболее актуальных в экологии. Для решения этой проблемы необходим комплекс мер, основанный на анализе влияния внешних воздействий, в том числе нагрузки и последующей разгрузки почвы, на изменение ее свойств.

Каждому физическому состоянию почвы в зависимости от ее влажности соответствует своя закономерность деформирования под действием сжимающей нагрузки. При влажностях w почвы, меньших ее полной влагоемкости и при сжимающих напряжениях σ, меньших предела прочности почвы σ_s, почва под действием на нее нагрузки уплотняется и упрочняется, вбок она почти не выдавливается. В результате передачи на почву посредством давления штампа сжимающего напряжения, приращение осадки, вызываемое ростом нагрузки, постепенно затухает и деформации стабилизируются. Настоящая работа посвящена исследованию и математическому моделированию закономерностей деформирования связных почв, находящихся в таком состоянии.

Материалы и деформируемые среды, для которых зависимости между напряжениями и деформациями включают в себя время t, называют вязкоупругими [1]. Уплотняющиеся связные почвы относятся к вязкоупругим средам.

В решении практических задач важную роль должны сыграть разработка и широкое применение уточненных методов расчета показателей, характеризующих изменение свойств почв под действием динамических и статических нагрузок. Точность методов расчета показателей воздействия внешних нагрузок на почву определяется в первую очередь выбором математических моделей деформирования почв.

Выполнено большое число экспериментальных и теоретических исследований с целью выявления связей между сжимающими напряжениями σ и относительными ε (а также полными h) деформациями сжатия почв и выбора уравнений для моделирования этих связей (определяющих уравнений). Однако при решении конкретных задач определяющие уравнения для почв принимаются не всегда достаточно обоснованно, условия и границы их применимости не устанавливаются. Это снижает возможности использования полученных результатов в практических расчетах.

Природа деформаций глинистых пород, в том числе и почв, выявлена в работах Н.Я. Денисова [2]. Деформации, возникающие в почвах вследствие приложения внешней нагрузки, делятся на обратимые и необратимые (остаточные). Обратимые деформации складываются из упругих и вязких.

Остаточные деформации твердых тел являются пластическими: они происходят в результате перемещений структурных элементов кристаллической решетки материалов и протекают с весьма незначительным изменением объема. Структурные деформации уплотняющихся почв, происходящие при сравнительно небольших давлениях, но с существенным уменьшением объема, не могут рассматриваться как пластические. Эти деформации представляют собой особый тип деформаций, свойственный только полидисперсным системам, находящимся в состоянии, при котором напряжения в связях между их структурными элементами превышают сцепление между ними. Структурные деформации почв могут быть условно отнесены к вязким, так как они возникают под действием сил любой малой величины и с увеличением действующих сил их скорости возрастают.

Исходные соотношения теории вязкоупругости представляют собой дифференциальные и интегральные уравнения. Имеются работы, в которых математические модели теории вязкоупругости применены для описания свойств почв при решении задач, связанных с исследованием качения жестких цилиндров по почве, воздействия тракторов и других мобильных машин на почву. При исследовании качения колес мобильных машин по почве большее применение нашел аппарат дифференциальных уравнений [3–6].

К наиболее простым определяющим уравнениям теории вязкоупругости относятся: модель Максвелла

$$\sigma_t' + (1/T)\sigma = E\varepsilon_t'; \qquad (1)$$

и модель Кельвина

$$\sigma = E\varepsilon + \mu\varepsilon_t', \qquad (2)$$

где E – модуль упругости среды или материала; μ – коэффициент вязкости, $T = \mu/E$ – время релаксации [7].

Уравнения (1) и (2) описывают свойства идеальных вязкоупругих сред. Эти и некоторые аналогичные им соотношения использованы в ряде работ в качестве определяющих уравнений для почв [3–6]. Однако экспериментального подтверждения пригодности моделей (1) и (2) для описания закономерностей деформирования каких-либо реальных почв определенного гранулометрического состава и физического состояния нет.

Если принять, что свойства почвы описываются уравнением (1), то из этого уравнения

при постоянных значениях его параметров при σ = constconst получим уравнение, характеризующее линейную ползучесть. Такого вида закономерность изменения деформации ползучести характерна для идеальной вязкоупругой среды Максвелла. Однако почва не является идеальной вязкоупругой средой. Из опытов известно, что при постоянных $\sigma < \sigma_s$ деформация почвы с течением времени стабилизируется [2].

В наших работах [8–11] процесс деформирования почвы во времени не имитировался никакой механической моделью. Уравнения, моделирующие процесс деформирования почв, получены в наших работах на основании теоретических предпосылок, исходя из данных о физико-механических свойствах почв [11].

Применение дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для моделирования закономерностей деформирования почв имеет ряд недостатков. Никакое дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами не позволяет описать все особенности деформирования во времени реальных сред и материалов.

Наиболее общей теорией, позволяющей моделировать закономерности деформирования вязкоупругих сред, является наследственная теория Больцмана-Вольтерра [1, 12, 13]. На основе этой теории найдены определяющие уравнения и их параметры для некоторых почв и грунтов [14–17]. В наших работах впервые выявлено, что вязкоупругие свойства ряда почв весьма точно моделирует уравнение нелинейной наследственной теории вязкоупругости, предложенное М.И. Розовским [13]. Путем математической обработки по методике, предложенной М.А. Колтуновым [1], ряда экспериментальных семейств кривых ползучести исследованных почв и семейств кривых релаксации напряжений в почвах нами найдены параметры определяющих интегральных уравнений для этих почв (характеристики вязкоупругих свойств почв). [10, 15, 17]

Время взаимодействия с почвой движителей мобильных машин весьма мало, во многих случаях – десятые или даже сотые доли секунды. Поэтому важно найти определяющее уравнение более простое, чем уравнение, предложенное М.И. Розовским, приближенно заменяющее это интегральное уравнение при малых t. Нами выполнен ряд исследований, цель которых состояла в том, чтобы найти дифференциальное уравнение, адекватно моделирующее закономерности сжатия почв определенного гранулометрического состава, найти характеристики вязкоупругих (реологических) свойств этих почв, выявить влияние повторных динамических нагрузок на почвы при проходах колесных тракторов на изменение вязкоупругих свойств почв.

Рассмотрим тот случай, когда верхний деформирующийся слой почвы, распространенный на глубину H, расположен на практически недеформирующемся основании. Поверхность почвы примем горизонтальной. Введем ось Oy с началом на поверхности почвы, направленную вертикально вниз. Плотность верхнего слоя почвы перед проходом по ней машин (начальная) переменна по глубине y [10, 18–22].

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена квадратичная зависимость плотности ρ верхнего слоя почвы до прохода тракторов от глубины y:

$$\rho(y) = \rho_0 + k_1 y + k_2 y^2 \quad \left(y \in [0;H]\right), \qquad (3)$$

где ρ_0 – значение плотности почвы, соответствующее $y = 0$; k_1 и $k_2 \neq 0$ – коэффициенты [22]. (Зависимость (3) получена также в результате статистической обработки экспериментальных данных в работах [21, 23] и др.)

На основании результатов исследований [8–11, 15 17, 18, 20–22, 24] закономерность сжатия почвы в направлении оси Oy при каждом фиксированном предложено нами моделировать дифференциальным уравнением:

$$\sigma'_t(t) + p\sigma(t) = q\varepsilon'_t(t). \qquad (4)$$

Коэффициенты $p = \left(\rho(y),\ \omega,\ w\right)$ и $q = q\left(\rho(y),\ \omega,\ w\right)$ уравнения (4) являются характеристиками вязкоупругих свойств почвы. Коэффициент q, МПа представляет собой модуль деформации почвы, он характеризует при ε = 1 полное напряжение, вызывающее упругую и вязкую деформации почвы. Коэффициент p, 1/с можно рассматривать как величину, обратную периоду релаксации $T_{\text{поч}}$ уплотняющейся связной почвы: $p = 1/T_{\text{поч}}$. Величины характеристик p и q вязкоупругих свойств почвы находят по экспериментальным данным, характеризующим зависимости между изменяющимися во времени сжимающими напряжениями и относительной деформацией сжатия почвы.

При качении колес машин почва деформируется по гармоническому закону, для которого $p = \omega g$, где g– безразмерная характеристика вязкоупругих свойств почвы; , 1/с – угловая частота деформирования по гармоническому закону, равная при качении колеса его угловой скорости. В этом случае вязкоупругие свойства почвы при каждом фиксированном описываются уравнением:

$$\sigma'_t(t) + \omega g\,\sigma(t) = q\varepsilon'_t(t). \qquad (5)$$

Проведен ряд полевых испытаний, в которых выявлено, что уравнение (4) и соответствующее ему при деформировании почвы по гармоническому закону уравнение (5) адекватно моделируют закономерность деформирования во времени дерново-подзолистых легкосуглинистых, дерново-подзолистых среднесуглинистых почв при их влажности $w = 20–26\,\%$, среднесуглинистых черноземных почв Среднего По-

волжья, торфяной почвы при $w = 58 – 74\%$, дерново-подзолистых супесчаных почв при $w = 9 – 17\%$. [9–11, 18–21, 25, 26].

Свойства дерново-подзолистых почв исследованы в наших опытах, которые состояли в последовательных проходах по одному следу жестких и эластичных колес тракторов и колес тензометрической тележки. До проведения наших опытов реологические свойства почв исследовали лишь в лабораторных условиях, проводя испытания образцов почв в приборах, что приводит к значительным отклонениям выявляемых закономерностей и найденных показателей, характеризующих реологические свойства почв, от реально существующих в природе.

В экспериментальном хозяйстве РГАУ–МСХА опыты проведены на двух полях с дерново-подзолистыми супесчаными почвами [21]. На обоих полях $H = 0{,}9$ м. Найдены плотность и влажность почвы перед опытами в слоях 0–0,1; …, 0,8–0,9 м. Перед проходами тракторов на каждом поле дважды проведено дискование почвы на глубину 0,3 м. Определены параметры уравнения (3) для почв, исследованных в работе [21]. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает большую точность расчетов $\rho(y)$ по уравнению (3).

Для выявления вязкоупругих свойств почвы в качестве деформирующего почву штампа применяли катящиеся колеса. Кривыми, характеризующими зависимости $\sigma \sim \varepsilon \sim t$ служили эпюры нормальных напряжений на поверхности контакта колеса с почвой. При качении эластичного колеса по почве деформируются почва и пневматическая шина. Для более точного исследования свойств почвы нужно исключить влияние деформации шины на изучаемые показатели, поэтому на первом поле проведены опыты при качении жесткого колеса. Экспериментальная установка представляла собой трактор Т-16, левое заднее колесо которого заменено стальным. Тяговую нагрузку создавал прицепленный сзади трактор Т-25А, которым управлял второй тракторист. Для раздельной оценки взаимодействия с почвой передние и задние колеса трактора Т-16 были расставлены на разную колею, с которой не совпадала колея трактора Т-25А.

Провели семь серий опытов. В каждой серии выполнили по шесть последовательных проходов трактора Т-16 по одному и тому же следу на пути 30 м. Влажность и плотность почвы измеряли перед первым и после всех последующих проходов жесткого колеса.

Во всех опытах находили нормальные напряжения $\sigma_r(t)$ в продольной плоскости симметрии колеса, распределенные вдоль линии его контакта с почвой. Для измерений в обод колеса был вмонтирован тензометрический датчик давления мембранного типа. На осциллограммы записаны: эпюры нормальных контактных напряжений, отметки нижнего положения датчика давления; сила тяги $P_{кр}$ на крюке трактора; отметки времени через каждые 0.01 с. В каждом опыте на осциллограммах записано по восемь – десять эпюр $\sigma_r(t)$. Эпюры, соответствующие одному проходу колеса по почве, представляют собой результаты параллельных опытов, в которых определяли характеристики вязкоупругих свойств почвы. Экспериментальные данные статистически обработали с помощью компьютерных программ Excel, Spss10. Найдены: ω; среднее время t_b набегания на почву и сбегания t_a колеса; углы $\psi_b = \omega t_b$ и $\psi_a = \omega t_a$, характеризующие размеры линии контакта колеса с почвой; напряжения $\sigma_r(\psi)$; вертикальные составляющие нормальных контактных напряжений $\sigma(\psi) = \sigma_r(\psi)\cos\psi$, где ψ – текущий угол контакта колеса с почвой ($\psi_a < 0$, $\psi_b > 0$, $|\psi_a| < \psi_b$).

Используя уравнение (5), краевые условия: $\sigma(\psi_b) = 0$ и $\sigma(\psi_a) = 0$, нашли формулу для определения напряжений $\sigma(\psi)$, представляющих собой напряжения сжатия почвы при качении колеса. Проверка по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости показала, что найденная формула для определения $\sigma(\psi)$ с соответствующей доверительной вероятностью адекватно описывает $\sigma(\psi)$. Это подтверждает адекватность моделирования закономерности сжатия исследованной супесчаной почвы уравнением (5) (и уравнением (4)).

Эпюры $\sigma(\psi)$ использованы для определения характеристик g и q почвы.

Характеристики и вязкоупругих свойств почвы зависят от ρ, w и угловой частоты деформирования по гармоническому закону, равной угловой скорости колеса ω. Путем обработки по компьютерной программе SGWIN 1.1 опытных данных, полученных на первом поле, найдены линейные уравнения регрессии:

$$g = 17{,}6951 - 7{,}9188\rho - 1{,}9907\omega + 0{,}0712w; \quad (6)$$

$$q = -2{,}214 + 5{,}4951\rho + 1{,}1845\omega - 0{,}0287w. \quad (7)$$

Коэффициенты множественной корреляции для уравнений (6) и (7) равны 0,9581 и 0,7002. Уравнения (6) и (7) соответствуют следующим интервалам изменения влияющих факторов: плотность абсолютно сухой почвы $\rho_c = \rho/(1 + 0{,}01w) = 1{,}01 – 1{,}46$ г/см^3, $w = 9–17\%$, $\omega = 1{,}89–3{,}08$ с$^{-1}$.

На втором поле экспериментальные данные о вязкоупругих свойствах почвы получены при качении эластичных колес. В каждой из семи серий опытов выполнено по шесть последовательных проходов по одному и тому же следу трактора МТЗ-82 на пути 30 м. Тяговую нагрузку на МТЗ-82 создавал прицепленный сзади трактор Т-25А. Для раздельной оценки взаимодействия с почвой передние и задние колеса трактора

МТЗ-82 были расставлены на разную колею, с которой не совпадала колея трактора Т-25А.

На втором поле проводили те же тензометрические измерения с той же аппаратурой, что и в опытах с жестким колесом. На осциллограммы записаны: эпюры $\sigma_r(\psi)$; отметки нижнего положения соответствующих датчиков; отметки времени через каждые 0,01 с; сила $P_{кр}$.

Тракторные колеса при качении по почве деформируются как практически линейно упругие при всех допустимых вертикальных нагрузках на их оси и давлении воздуха в шинах [10, 27]. Принята схема для определения размеров линии контакта упругого эластичного колеса радиуса R с вязкоупругой почвой, предложенная в работе [27]. Угловая скорость $\omega_{пр}$ условного жесткого колеса радиуса $R_{пр}$ равна $\omega_{пр} = \omega_k R / R_{пр}$, где ω_k – угловая скорость эластичного колеса.

В каждом опыте на осциллограммы записано по восемь – десять эпюр $\sigma_r(\psi)$ на переднем и по шесть – семь – на заднем колесе. Эпюры $\sigma(\psi) = \sigma_r(\psi)\cos\psi$ использованы для определения характеристик g и q вязкоупругих свойств почвы.

Проверка по критерию Фишера при 5%-м уровне значимости показала, что найденная формула для определения напряжений сжатия почвы $\sigma(\psi)$ с соответствующей доверительной вероятностью адекватно описывает $\sigma(\psi)$. Это свидетельствует о том, что дифференциальное уравнение (5) моделирует свойства исследованной супесчаной почвы адекватно.

Путем обработки по программе SGWIN 1.1 опытных данных, полученных на втором поле, найдены следующие линейные уравнения регрессии ($\omega = \omega_{пр}$):

$$g = 14{,}1636 - 7{,}6164\rho - 0{,}4238\omega + 0{,}0688w; \quad (8)$$

$$q = -3{,}6556 + 6{,}3078\rho + 2{,}1039\omega - 0{,}1859w. \quad (9)$$

Коэффициенты множественной корреляции для уравнений (8) и (9) равны 0,8468 и 0,7736. Эти уравнения соответствуют следующим интервалам изменения влияющих факторов: $\rho_c = \rho / (1 + 0{,}01w) = 0{,}99 - 1{,}50$ г/см^3, w = 10–17%, ω = 0,88–2,97 с$^{-1}$.

Таким образом, при определении характеристик g и q вязкоупругих свойств почвы предложенными методами (для жесткого и эластичных колес) получены близкие результаты (отличия обусловлены некоторыми различиями свойств почв на первом и втором полях).

Данные, полученные в опытах на обоих полях, обработаны статистически совместно. В результате нашли уравнения регрессии:

$$g = 16{,}3470 - 8{,}2460\rho - 0{,}9399\omega + 0{,}0302w; \quad (10)$$

$$q = -0{,}2977 + 3{,}7212\rho + 0{,}2400\omega - 0{,}1328w + 1{,}1442\rho\omega, \quad (11)$$

где для эластичного колеса с приведенным радиусом $R_{пр}$ имеем $\omega = \omega_{пр}$.

Коэффициент множественной корреляции линейного уравнения (10) равен 0,8465, корреляционное отношение нелинейного уравнения регрессии (11) равно 0,7829, что свидетельствует о достаточно большой тесноте связи между влияющими и результативными факторами. Уравнения (10) и (11) соответствуют следующим интервалам изменения влияющих факторов: ρ = 1,09–1,65 г/см^3, w = 9–17%, ω = 0,88–3,08 с$^{-1}$.

Весьма значительная теснота связи между влияющими и результативными факторами в уравнениях регрессии (10) и (11) показывает, что в определенных интервалах изменения гранулометрического состава, а также ρ, ω и w, почвы на разных полях имеют близкие характеристики реологических (вязкоупругих) свойств. Видим, что реологические свойства связаны с широко известными другими показателями физических свойств почв. Зная эти показатели физических свойств почв, можно классифицировать почвы по значениям характеристик их реологических свойств. Располагая экспериментальными данными, полученными на различных полях для ряда почв, показатели физических свойств которых находятся в определенных известных интервалах, можно получать и применять в расчетах общие уравнения регрессии для нахождения характеристик реологических свойств почв.

Проведенные исследования выявляют физическую природу вязкоупругих свойств почв. С увеличением плотности почвы и скорости ее деформирования уменьшается и стремится к нулю характеристика g вязкоупругих свойств почвы, а характеристика q возрастает. При этом $g \to 0$, а $q \to E$. Свойства почвы приближаются к упругим.

При увеличении влажности w почвы характеристика g возрастает, а характеристика q убывает, причем $q \to 0$. Рост влажности почвы приводит к изменению ее физического состояния: упругость почвы снижается, свойства почвы приближаются к текучим.

Таким образом, получены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность и достоинства моделирования уравнением (4) (а также (5)) закономерности деформирования во времени ряда уплотняющихся почв. По предложенным методам найдены характеристики вязкоупругих свойств почв. Дальнейшие исследования реологических свойств различных почв будут способствовать созданию уточненных методов расчета показателей напряженно-деформированного состояния почв при действии внешних нагрузок, разработке и практическо-

му применению мер по сохранению плодородия почв, повышению урожайности полевых культур.

Список литературы

1. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высшая школа, 1976.

2. Денисов Н.Я. О природе деформаций глинистых пород. – М.: Изд-во Мин. речного флота, 1951.

3. May W.D., Morris E.L., Atack D. Rolling friction cylinder over a viscoelastic material // I. Appi. Rhys. – 1959.

4. Ишлинский А.Ю., Кондратьева А.С. О качении жестких и пневматических колес по деформируемому грунту. // Тр. совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950.

5. Ишлинский А.Ю. Трение качения // ПММ. – М.: 1938. –Т. 2. –Вып. 2.

6. Пархоменко Г.Г., Щиров В.Н. Расчет взаимодействия катка с почвой с использованием теории вязкоупругости // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 10.

7. Реология. Теория и приложения: пер. с англ. / под ред. Ф. Эйриха. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1962.

8. Золотаревская Д.И. Влияние вязкоупругих свойств почвы и сил трения на тяговые свойства и уплотняющее воздействие на почву колесных тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 3.

9. Золотаревская Д.И. Исследование влияния реологических свойств грунта на сопротивление качению ведомых колес: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М.: МАМИ, 1971.

10. Золотаревская Д.И. Основы теории и методы расчета уплотняющего воздействия на почву колесных движителей мобильной сельскохозяйственной техники: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВИСХОМ, 1997.

11. Золотаревская Д.И. О трении качения при движении колес по уплотняющемуся грунту // Доклады ТСХА. – 1968. – Вып. 136.

12. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979.

13. Розовский М.И. Ползучесть и длительное разрушение материалов // Журнал технической физики. – 1951 – Т. XX1. – № 11.

14. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978.

15. Золотаревская Д.И. Взаимосвязь различных математических моделей деформирования почв // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 5.

16. Носов С.В. Мобильные энергетические средства: выбор параметров и режимов работы через реологические свойства опорного основания. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2006.

17. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв и их математическое моделирование // Почвоведение. – 1998. – № 1.

18. Золотаревская Д.И., Бурдыкин В.И., Матвеев В.В., Трушин В.Г., Лядин В.П. Изменение вязкоупругих свойств почвы при воздействии колесного трактора // Известия ТСХА. – 1989. – Вып. 1.

19. Русанов В. А. Проблема переуплотнения почв пути ее решения. – М.: РАСХН, ВИМ, 1998.

20. Золотаревская Д.И., Джафаринаими К., Лядин В.П. Изменение реологических свойств и уплотнение почвы при воздействии колесных движителей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 5.

21. Золотаревская Д.И., Иванцова Н.Н., Лядин В.П. Математическое моделирование деформирования почв при качении колес // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 5.

22. Золотаревская Д.И. Особенности качения колес по вязкоупругой почве // Тракторы и сельскохозяйственные машины. –2005. – № 8.

23. Акинин Д.В. Деформация лесных почв при многократных проходах гусеничного трелевочного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Московский государственный университет леса, 2001.

24. Золотаревская Д.И. Распространение волн деформации и уплотнение вязкоупругой среды при качении цилиндра // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80. – № 5.

25. Маслов В.С. Снижение уплотняющего воздействия на почву при работе трактора типа «Кировец» на возделывании зерновых культур: дис. ... канд. техн. наук. – Рязань: Рязанский СХИ, 1987.

26. Хабатов Р.Ш., Золотаревская Д.И., Ходыкин В.Т. Моделирование уплотнения почвы колесными движителями // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. – № 1.

27. Золотаревская Д.И. Расчет уплотнения почвы колесными тракторами // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1990. – № 6.

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦЫ

Исаев Ю.М., Семашкин Н.М., Евстигнеева О.Г., Кошкина А.О.

ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина», Ульяновск, e-mail: isurmi@yandex.ru

Большая доля сельскохозяйственных работ включат в себя процессы транспортирования зерна, в частности и вертикального его перемещения.

Одним из направлений реализации таких технологий является создание средств механизации перемещения сельхозпродукции на основе вращающихся спирально-винтовых рабочих органов.

Рассмотрим решение задачи о пропускной способности вертикального винтового транспортера. Пусть малая материальная частица располагается на винтовой поверхности спирали, установленной в кожухе и вращающейся относительно оси с угловой скоростью ω. Рассмотрим взаимодействие частицы со спиральным винтом и корпусом. Нормальная реакция N_1, действующая на частицу со стороны витка спирали, составляет угол θ, с перпендикуляром к винтовой наклонной линии, а перпендикуляр, в свою очередь, угол α, с осью z. Сила трения направлена в сторону, обратную движению, и располагается на линии вектора скорости υ_0, т.е. $F_1 = f_1 \cdot N_1$, где f_1– коэффициент трения частицы о спиральный винт. Егол θ между нормальной реакцией поверхности витка спирали и осью Oy характеризует геометрические характеристики спирального винта, цилиндрического кожуха и размер частиц сыпучего материала в транспортере, определяемый из выражения:

$$\theta = \arcsin\left(\left(r - r_2 + d/2 - r_1\right)/\left(r_1 + d/2\right)\right)$$

где r – внутренний радиус цилиндрического кожуха, м; r_1 – радиус частицы, м; r_2 – радиус спирального винта, м; d – диаметр проволоки, м.

Следовательно, для движения материала вверх вдоль оси спирали необходимо соблюсти условие

$$\omega \geq \sqrt{\frac{\mathrm{tg}\left(\alpha + \varphi_1\right) \cdot g}{r f_2}},$$

где $\varphi_1 = \mathrm{arctg}\left(\frac{f_1}{\cos\theta}\right)$, g – ускорение свободного падения, м/с^2; f_2 – коэффициент трения частицы о внутреннюю поверхность кожуха.