

УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ХОДОВЫХ СИСТЕМ

А. Н. Орда, докт. техн. наук, доцент, А. Б. Селеши, инженер (УО БГАТУ)

Аннотация

Рассмотрены вопросы формирования ядра уплотнения при воздействии на почву ходовых систем. В результате составления и решения дифференциального уравнения сжатия почвы получена зависимость «напряжение – деформация сжатия». Уплотнение почвы имеет аналогичный характер, что и процесс деформации сжатия. Предложенные зависимости уплотнения почвы позволяют обосновать допустимый уровень давления ходовых систем на почву.

Введение

При деформировании почвы происходит разрушение структурных агрегатов, выжимание воды и воздуха из пор, а также сжатие пузырьков воздуха, защемленных в порах. Относительная доля того или иного из приведенных выше явлений зависит от состояния почвы. Имеющиеся сдвиги частиц и разрушение структурных элементов, выжимание из почвы воздуха определяют собой необратимые деформации, а сжатие воды и защемленных объемов воздуха — упругие, т. е. восстанавливающиеся при снятии нагрузки [1, с. 140].

При сжатии почвы штампом с увеличением нагрузки осадка растет не только из-за уплотнения, но и в результате выдавливания частиц из-под штампа в окружающую среду. Сжатие сопровождается образованием уплотненной зоны, имеющей форму конуса (рис. 1), основанием которого служит опорная поверхность штампа. С окончанием образования уплотненной зоны возникает устойчивое движение частиц почвы около штампа, сжимающее усилие при дальнейшем погружении его в почву не увеличивается. Давление, с которым штамп действует в этом случае на почву, достигает предела несущей способности почвы [2, 3].

Осадку штампа h формируются из деформаций отдельных слоев почвы. Верхние слои почвы сжимаются в большей мере. Из-за этого плотность почвы по глубине распределяется неравномерно. Высота уплотняемого

слоя зависит не только от величины давления, но и от размеров опорной поверхности деформатора.

Основой расчета уплотнения почвы служат зависимости между напряжением сжатия σ и осадкой штампа h . Наиболее часто применяются следующие зависимости:

$$\sigma = kh; \quad (1)$$

$$\sigma = ch; \quad (2)$$

$$\sigma = p_0 th \left(\frac{k}{p_0} h \right), \quad (3)$$

где k — коэффициент объемного смятия почвы, $\text{H}/\text{м}^3$;

c — константа;

μ — показатель степени деформируемости почвы;

p_0 — предел несущей способности почвы, Па.

К недостаткам линейной (1) и степенной (2) функций следует отнести то, что, согласно им, наблюдается беспредельный рост сопротивления сжатию при увеличении деформации.

Зависимость гиперболического тангенса (3), предложенная В. В. Кацъгиным, учитывает факт образования ядра уплотнения. После образования ядра уплотнения напряжение σ достигает предела несущей способности p_0 (рис. 2).

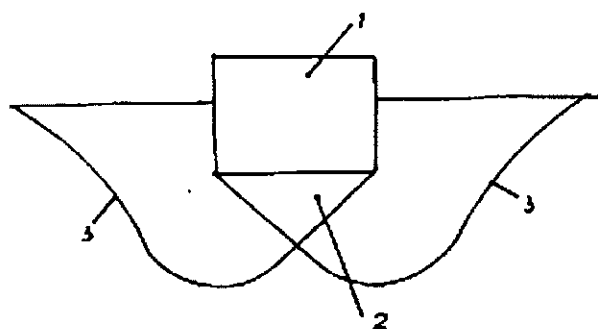


Рис. 1. Образование ядра уплотнения при вдавлении штампа:

- 1 — штамп; 2 — ядро уплотнения;
3 — поверхности скольжения

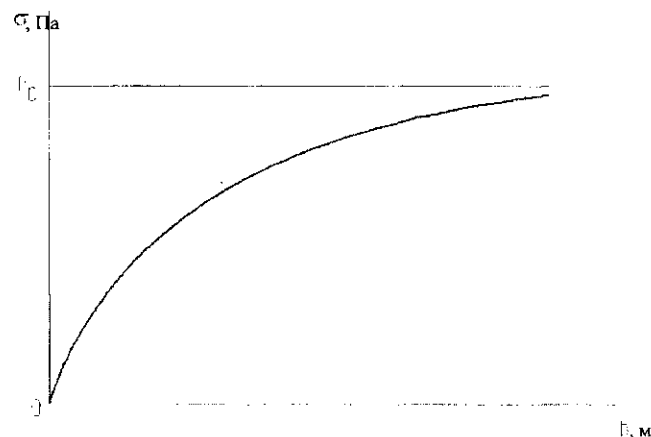


Рис. 2. Зависимость между напряжением и осадкой почвы

На величину плотности почвы в следе влияет деформация сжатия в ядре уплотнения. Составим дифференциальное уравнение сжатия почвы в ядре уплотнения. Высота ядра уплотнения имеет ограниченную величину.

Для слоя почвы ограниченной высоты приращение деформации сжатия обратно пропорционально величине напряжения σ [4, с. 159].

$$dh_{\text{сж}} = \frac{d\sigma}{a\sigma}, \quad (4)$$

где a – коэффициент пропорциональности.

Преобразуем уравнение (4) к виду

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = a dh_{\text{сж}} \quad (5)$$

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (5)

$$\ln \sigma = ah_{\text{сж}} + C, \quad (6)$$

где C – постоянная интегрирования.

Постоянную интегрирования C найдем из условия, что деформация сжатия $h_{\text{сж}}$ достигает предельного значения $h_{\text{пред}}$ в случае, когда напряжение в контакте колеса с почвой σ достигает предела несущей способности p_0 . В этом случае уравнение (6) примет вид:

$$\ln p_0 = ah_{\text{пред}} + C. \quad (7)$$

Из уравнения (7) найдем C

$$C = \ln p_0 - ah_{\text{пред}}. \quad (8)$$

Подставим полученное выражение постоянной интегрирования C в уравнение (6):

$$\ln \sigma = ah_{\text{сж}} + \ln p_0 - ah_{\text{пред}} \quad (9)$$

Представим уравнение (9) в виде

$$\ln p_0 - \ln \sigma = a(h_{\text{пред}} - h_{\text{сж}})$$

или

$$\ln \frac{p_0}{\sigma} = a(h_{\text{пред}} - h_{\text{сж}}). \quad (10)$$

Из уравнения (10) найдем

$$\sigma = \frac{p_0}{e^{a(h_{\text{пред}} - h_{\text{сж}})}}. \quad (11)$$

Для того чтобы использовать зависимость (11) для определения закономерности уплотнения почвы под нагрузкой, найдем из нее деформацию сжатия

$$h_{\text{сж}} = h_{\text{пред}} + \frac{1}{a} \ln \frac{\sigma}{p_0}. \quad (12)$$

Зависимость (12) не имеет смысла при напряжении σ , равном нулю, так как логарифм нуля не имеет смысла. Однако известно, что до уплотнения почва обладает определенной структурной прочностью, обусловленной сцеплением, капиллярным давлением, сжатием вышележащих слоев. Поэтому представим зависимость (12) в следующем виде:

$$h_{\text{сж}} = h_{\text{пред}} + \frac{1}{a} \ln \frac{\sigma + \sigma_0}{p_0}, \quad (13)$$

где σ_0 – структурная прочность почвы, Па.

Плотность почвы под воздействием нагрузки складывается из первоначальной плотности почвы $\rho_{\text{п}}$ и приращения плотности $\Delta\rho$ от сжатия в ядре уплотнения:

$$\rho = \rho_{\text{п}} + \Delta\rho, \quad (14)$$

где $\rho_{\text{п}}$ – первоначальная плотность почвы, кг/м³;

$\Delta\rho$ – приращение плотности, кг/м³.

На основании зависимостей (13) и (14) получим:

$$\rho = \rho_{\text{п}} + k_{\text{п}} \left(h_{\text{пред}} + \frac{1}{a} \ln \frac{\sigma + \sigma_0}{p_0} \right), \quad (15)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности между деформацией сжатия и плотностью почвы, кг/м³.

Представим формулу (15) следующим образом:

$$\rho = \rho_{\text{п}} + k_{\text{п}} h_{\text{пред}} + \frac{k_{\text{п}}}{a} \ln \frac{\sigma + \sigma_0}{p_0}. \quad (16)$$

Отношение коэффициентов $\frac{k_{\text{п}}}{a}$ в формуле (16) представляет собой коэффициент уплотнения, устанавливающий взаимосвязь между нагрузкой и плотностью. Согласно исследованиям [7] коэффициент уплотнения равен

$$k_1 = \frac{\rho_{\text{п}} \beta}{k}, \quad (17)$$

где k_1 – коэффициент уплотнения, кг/мН;

β – коэффициент распределения напряжений, м⁻¹.

С учетом формулы (17) зависимость (16) примет вид

$$\rho = \rho_{\text{п}} + \Delta\rho_{\text{пред}} + \frac{k_{\text{в}} \rho_{\text{п}} \beta}{a} \ln \frac{\sigma + \sigma_0}{p_0}, \quad (18)$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент взаимосвязи параметров уплотнения; Н/м²;

$\Delta\rho_{\text{пред}}$ – приращение плотности в ядре уплотнения до максимально возможной, кг/м³.

Так как $\ln \frac{\sigma + \sigma_0}{p_0} < 0$, то третий член зависимости является отрицательным. Поэтому эту зависимость можно представить следующим образом

$$\rho = \rho_{\text{п}} + \Delta\rho_{\text{пред}} - \frac{k_{\text{в}} \rho_{\text{п}} \beta}{k} \ln \frac{p_0}{\sigma + \sigma_0}. \quad (19)$$

Второй член зависимости (19) $\Delta\rho_{\text{пред}}$ представим в виде произведения коэффициента предельного увеличения плотности $k_{\text{пред}}$ и исходной плотности почвы $\rho_{\text{п}}$. Тогда зависимость плотности почвы от давления примет вид

$$\rho = \rho_{\text{п}} \left(1 + k_{\text{пред}} - \frac{k_{\text{в}} \beta}{k} \ln \frac{p_0}{\sigma + \sigma_0} \right) \quad (20)$$

Из рис. 3, построенного на основании зависимости (20), видно, что при достижении давлением предела несущей способности прирост плотности почвы в ядре уплотнения затухает, что соответствует экспериментальным данным [3].

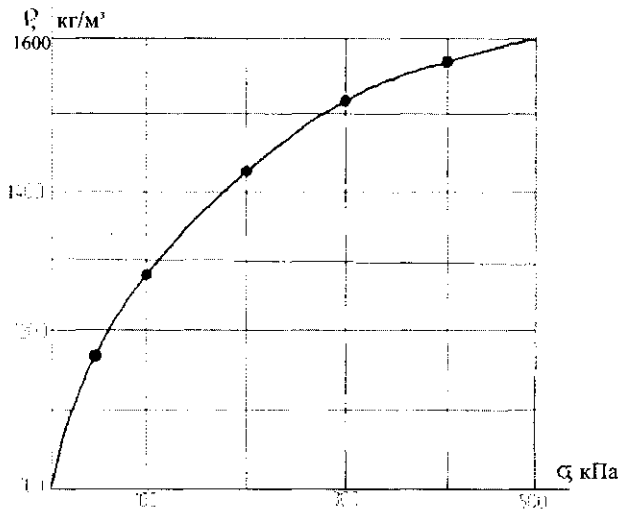


Рис. 3. Зависимость между напряжением и плотностью почвы при $p_0 = 500 \text{ кПа}$, $\rho_n = 1000 \text{ кг/м}^3$

От плотности почвы зависит ее структура, которая оценивается по содержанию агрегатов различных размеров. Агрономически ценными являются почвенные агрегаты от 0,25 до 10 мм. Для оценки состояния почвы применяют коэффициент структурности [5, с. 50]

$$k_{\text{стр}} = \frac{\sum(0,25 \text{ мм} - 10 \text{ мм})}{\sum(>10 \text{ мм} < 0,25 \text{ мм})^2}, \quad (21)$$

где $\Sigma(0,25 \text{ мм} - 10 \text{ мм})$ – содержание агрономически ценных агрегатов, %; $\Sigma(>10 \text{ мм}, <0,25 \text{ мм})$ – содержание агрегатов более 10 мм и менее 0,25 мм, %.

Если коэффициент структурности выше 1,5, то состояние почвы отличное. Неудовлетворительное состояние почвы при $k_{\text{стр}} < 0,67$. Если $0,67 < k_{\text{стр}} < 1,5$, то состояние почвы принято считать хорошим.

Со структурой почвы тесно связана структура порового пространства, т. е. распределение пор по размерам. В порах создается запас воды и содержится почвенный воздух. Высокая инфильтрационная способность почв способствует понижению поверхностного стока и приводит к снижению водной эрозии. Определенное соотношение пор по размерам обеспечивает оптимальные условия водного и воздушного режимов почв.

Пористость почвы E – это отношение объема пор к общему объему почвы.

Так как объем твердой фазы может быть выражен через отношение плотности сложения (скелета) почвы к плотности твердой фазы почвы, то

$$E = (1 - V_T)100 = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)100 \%, \quad (22)$$

где E – пористость почвы;

1 – единичный объем почвы;

V_T – объем твердой фазы почвы.

Коэффициент пористости e представляет собой отношение объема пор V_n к объему твердой фазы V_T :

$$e = \frac{V_n}{V_T} = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 = \frac{E}{1 - E}. \quad (23)$$

С помощью структуры почв можно управлять пористостью и физическими свойствами. При плотной упаковке частиц почвы пористость составляет 25–26 %. Микроагрегирование почвы приводит к возрастанию пористости до 40–50 %, а макроагрегирование – до 60 % [6, с. 101].

При оценке воздействия движителей на почву коэффициент пористости является более обоснованным параметром, чем пористость, так как в процессе деформации почвы необходимо относить все объемные изменения к неизменному объему твердых частиц [5, с. 56]. Оптимальная пористость многих почв близка к 50 %. В этом случае согласно формуле (23) коэффициент пористости равен единице. Воздействие колесных и гусеничных ходовых систем сопровождается повторностью нагружения почвы опорными элементами.

Нарастание осадки при повторных нагружениях подчиняется зависимости [7]

$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_n \lg N) \operatorname{arth} \left(\frac{\sigma}{p_0} \right), \quad (24)$$

где k_n – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации;

N – число циклов нагружения.

С учетом зависимостей (20) и (24) накопление уплотнений при повторных нагружениях имеет вид:

$$\rho_n = \rho_n \left(1 + k_{\text{пред}} - \frac{k_v \beta}{k} \ln \frac{p_0}{\sigma + \sigma_0} \right) (1 + k_n \lg N). \quad (25)$$

С помощью зависимостей (22), (23) и (25) можно определить допустимое давление для различных по характеру передачи нагрузки на почву ходовых систем тракторов и сельскохозяйственных машин.

Заключение

Изложенный в статье теоретический анализ позволил установить зависимость между напряжением и плотностью почвы, учитывающую процесс формирования ядра уплотнения. Данная зависимость отражает известный из экспериментов факт прекращения увеличения плотности почвы после завершения формирования ядра уплотнения. На основании предложенной зависимости уплотнения и оптимальной пористости почвы можно обосновать допустимый уровень воздействия, учитывающий характер передачи нагрузки ходовой системы на почву.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков, В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов/В. Ф. Бабков, В. М. Безрук. – М.: Высшая школа. 1976. – 328 с.

2. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий. // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск: Ураджай, 1964. Т. 13 – С. 5 – 147.

3. Кушнарев, А. С. Уменьшение вредного воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машинных агрегатов при внедрении индустриальных технологий возделывания сельскохозяйственных культур/А. С. Кушнарев, В. М. Мацепуро. – М.: 1986. – 56 с.

4. Булычев, В. Г. Механика дисперсных грунтов. – М.: Стройиздат, 1974. – 226 с.

5. Шеин, Е. В. Агрофизика/Е. В. Шеин, В. М. Гончаров. – Ростов н/Д.: Феникс, 2006. – 400 с.

6. Воронин, А. Д. Основы физики почв. – М.: МГУ, 1986.

7. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов. – Дис... д-ра техн. наук: 05.20.03/БГАТУ. – Минск, 1997. 269 с.

УДК 637.133.1.02

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.12.2006

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИСПАРИТЕЛЯ ХОЛОДИЛЬНОГО АГРЕГАТА МОЛОКООХЛАДИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СМ-1250

В. В. Кузьмич, докт. техн. наук, ст. науч. сотруд., Д. В. Зимницкий, ст. науч. сотруд.
(НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства)

Аннотация

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований работы молокоохладительной установки СМ-1250 с коррозионно-стойким панельным испарителем. На основании сравнения данных, полученных в охладителе с новым испарителем, с результатами наблюдения процесса охлаждения молока в обычном молокоохладителе с трубчатым испарителем и результатами теоретических исследований сделаны выводы о влиянии параметров нового испарителя на динамику охлаждения. Проведено сравнение молокоохладителя с усовершенствованным испарителем с обычным молокоохладителем по показателям качества.

Введение

В настоящее время на молочнотоварных фермах Республики Беларусь эксплуатируется около 12 тыс. установок для охлаждения молока [1]. В большинстве своем они морально и технически устарели. Основное количество оборудования базируется на конструкциях, разработанных более 20 лет назад, и не в полной мере соответствует нормам эксплуатации и производственным условиям предприятий, производящих молочную продукцию. Технологическая потребность хозяйств республики в молокоохладительных установках составляет дополнительно 6 тыс. установок [1]. В Беларуси до недавнего времени производился только один тип молокоохладительных установок СЛ-1600. Поэтому перед учеными и инженерно – техническими работниками стоит задача разработки и освоения производства рациональных молокоохладительных установок для полного обеспечения потребности сельскохозяйственных предприятий республики.

В состав современного молокоохладительного оборудования входят ванна для сбора молока и холодильный агрегат. Холодильный агрегат состоит из компрессора, электродвигателя с осевым вентилятором, конденсато-

ра воздушного охлаждения, ресивера – теплообменника, фильтра – осушителя и испарителя. Одной из наиболее важных деталей холодильного агрегата является испаритель.

Испаритель – элемент холодильной машины, в котором рабочее вещество кипит за счет теплоты, подводимой от источника низкой температуры. Высокая теплоемкость промежуточного теплоносителя (как правило, воды или рассола) в молокоохладительных установках типа СМ-1250 позволяет снизить требования к теплотехническим характеристикам теплообменных поверхностей испарителей. Наиболее приемлемым материалом по стоимости и теплопроводности в этом случае становится железо. Основным ограничением применения железа в испарителях молокоохладителей до настоящего времени служила низкая коррозионная стойкость железа в агрессивных средах промежуточных теплоносителей. Решения задачи повышения коррозионной устойчивости можно достичь применением для испарителя трубы из нержавеющей стали с минимальной конструктивной и технологической толщиной стенки, или с помощью горячего цинкования испарителя при применении труб из углеродистой стали. Использование горячего цинкования не может гаранти-