

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ МАССЫ

П.К.Черник, канд. техн. наук, С.В. Основин, канд. с/х наук (РУП “Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси”); Л.Г. Основина, канд. техн. наук (УО БГСХА)

Аннотация

Используя полученные зависимости, рассчитывается степень уплотнения силосуемой массы в хранилище на любой момент времени, а соответственно и содержание в ней воздуха, что позволяет управлять процессом силосования путем назначения величины уплотняющей нагрузки в зависимости от показателей физических свойств и структурных характеристик укладываемой массы.

Введение

Для получения качественных силосованных кормов необходимо выполнить три основных требования: как можно быстрее заполнить хранилище; как можно лучше уплотнить массу в хранилище; хорошо герметизировать хранилище. Невыполнение любого из этих требований неизбежно ведет к большим потерям питательных веществ как в процессе заполнения хранилища, так и в процессе брожения корма. Выполнение первого и третьего требований зависит в основном от организации производственных процессов в каждом конкретном случае. Выполнение второго требования зависит от применяемой технологии.

Основная часть

Значения расчетных реологических параметров в полученных формулах зависят от величины уплотняющей нагрузки и структурных характеристик любого материала, в том числе и зеленой массы измельченных трав. Определяющим же фактором является величина уплотняющей нагрузки, все остальные факторы оказывают не столь существенное влияние на эти параметры для любых материалов. Поэтому, несмотря на то, что структурные характеристики массы измельченных трав и биогенных грунтов изменяются в достаточно широком диапазоне, значения расчетных параметров и диапазон изменений для них существенно не отличаются.

По традиционной технологии уплотнение массы осуществляется в горизонтальных хранилищах динамической нагрузкой путем трамбования укладываемой массы тракторами. Измельченная масса трав при любой влажности обладает упругими свойствами. После первых проходов трактора происходит смятие массы и более плотная упаковка частиц, но при этом значительная часть ее объема уплотнения восстанавливается после прохода трактора. Эффективность процесса уплотнения зависит от влажности массы, степени ее измельчения и массы уплотняющего механизма.

Исследованиями И.С. Колтушкина [1] установлена зависимость пористости m от относительной влажности материала W в виде:

$$M = 1 - 0.667 \cdot (1 + 0.5W) \cdot \gamma, \quad (1)$$

где γ - объемная масса растительного материала, г/см³.

Структурные свойства стебелного материала изучали И.В. Грачев, А.В. Гвоздев, А.В. Кузьмицкий [2, 3, 4]. В результате проведенных исследований А.В.Кузьмицкий установил, что в зависимости от влажности W материала объемная масса травяного сырья (с учётом того, что средняя величина угла ориентации частиц составляет 22...25°), определяется по формуле:

$$Y = 117,4 + 1584,8 \cdot (1 + K_{\lambda})^{0,5} \cdot ((1 + 0,5W)/(1 - W))^{0,5} \cdot \frac{1}{l_{cp}}. \quad (2)$$

Длина резки материала является основной технологической характеристикой и существенно влияет на величину насыпной объемной массы. Исследованиями установлено, что с уменьшением длины резки от 90 до 30 мм объемная масса изменяется незначительно, а вот в дальнейшем с уменьшением длины частиц до 10 мм наблюдается резкое увеличение γ с 228.7 кг/м³ при влажности $W = 60\%$ до 462.8 кг/м³, т.е. более чем в два раза. Отсюда следует, что для достижения высокой начальной плотности стебелной массы (что особенно важно при заготовке сенажа) необходимо обеспечить длину резки порядка 10...20 мм, что согласуется с рекомендациями специалистов [5].

Исследования остаточных деформаций при уплотнении укладываемой в хранилище массы с влажностью $W = 0,69$ показали, что при толщине слоя уложенной массы 100 см после пяти проходов трактора интенсивность уплотнения резко уменьшается и в дальнейшем процесс неэффективен, объем силосуемой массы практически полностью восстанавливается. При толщине слоя массы 280 см характер уплотнения резко изменяется. С увеличением числа проходов трактора плотность массы возрастает практически пропорционально числу проходов трактора по одному следу

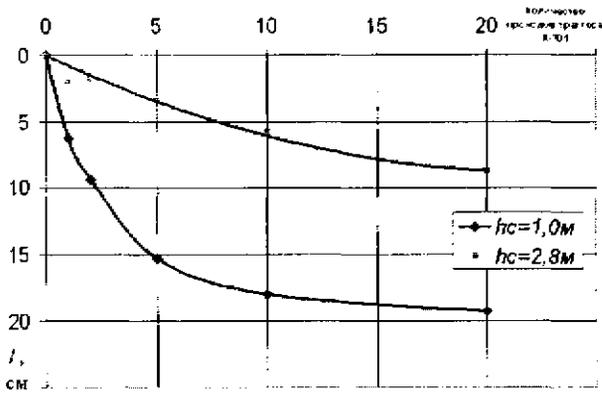


Рис. 1. Обшая деформация уплотнения массы с $W = 0,69$ при трамбовании трактором К-701 для различной толщины слоя h_c .

(рис. 1). Это объясняется тем, что вышележащие слои действуют как груз. Следовательно, эффективность уплотнения динамической нагрузкой путем трамбования тракторами повышается на завершающей стадии заполнения хранилища.

Эффективность уплотнения повышается с увеличением степени измельчения массы. Однако это связано с трудностями технологического характера, обусловленными необходимостью периодической заточки ножей кормоуборочных механизмов, что в напряженные моменты уборки не всегда осуществимо.

Заготовка кормов с измельчением связана с большим объемом сыпного материала, частицы которого ориентированы в пространстве случайным образом, за счет чего сыпной материал сохраняет пористость 0,76 – 0,86 до разравнивания и уплотнения. Исследованиями А.В. Кузьмичко установлено, что с увеличением длины элементов с 10 до 130 мм в интервале диаметров 3,5 – 30 мм пористость модели возрастает с 0,41 до 0,9. Чем меньше диаметр стеблей, тем меньше должна быть длина резки для достижения нижнего критического порога пористости, т.е. более плотной укладки при уплотнении зеленой массы динамической нагрузкой [4].

При трамбовании массы тракторами на любой стадии заполнения хранилища воздух из уложенной массы отжимается, а после снятия нагрузки всасывается в результате ее разуплотнения. Происходит постоянное обогащение уложенной массы кислородом, вследствие этого интенсифицируются биологические процессы, неизбежно ведущие к потере питательных веществ в процессе силосования. Наиболее эффективным способом является уплотнение измельченной массы трав статической (постоянно действующей) нагрузкой. Использование этого способа возможно при знании ее реологических свойств.

В процессе уплотнения зеленой массы происходит релаксация напряжений, которая непосредственно связана с характером деформирования зеленой массы и аналогична такому же процессу для грунтов (торфа). Это имеет большое значение для понимания процессов деформирования. Малая изученность этого процесса

для грунтов и отсутствие материалов по изучению этого процесса для зеленой массы измельченных трав объясняется отсутствием четкой методики и соответствующих приборов [6].

Для описания процессов релаксации твердых тел пользуются классическим методом Максвелла, разработанным для газов. Исходным в нем является уравнение, описывающее скорость изменения деформаций как сумму скорости истинного течения и скорости упругого смещения:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma + \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt}, \quad (3)$$

где λ – вязкость;
 σ – модуль сдвига.

При релаксации, когда $\lambda = \text{const}$, $\delta = \delta_0 e^{-t/\tau}$, уравнение принимает следующий вид:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}, \quad (4)$$

Время релаксации $-\frac{\eta}{\sigma} = \tau$.

При $t = \tau$, модуль сдвига $\sigma = \frac{\sigma_0}{e}$, то есть за это

время начальное напряжение снизится в «e» раз.

Скорость процесса изменения напряженного состояния характеризует состояние любого материала на любой момент времени, которое и определяет его деформационные свойства. Кроме того, оно характеризует скорость перехода упруго-мгновенных деформаций в остаточные. Анализ экспериментальных данных показывает, что на практике снижение напряжений в торфе происходит интенсивнее, чем для идеальных тел. В. М. Исвлев [7], по результатам опытов, установил, что характер релаксации напряжений не зависит от их начальной величины. Поэтому время процесса релаксации грунта приобретает значение константы:

$$\tau_0 = t_0 \left(\frac{t}{t_0} \right) \frac{\sigma}{\sigma_0 - \sigma}, \quad (5)$$

где τ_0 – время, в течение которого напряжение от начала процесса снизится до нулевого значения ($\sigma = 0$).

Эта формула позволяет по данным экспериментальных исследований найти значение времени процесса релаксации напряжений.

Деформации зеленой массы измельченных трав, как и грунтов, можно разделить (качественно и количественно) на восстанавливающиеся (обратимые) и остаточные (пластические). Обратимые деформации могут быть разделены на мгновенно восстанавливающиеся и восстанавливающиеся с последствием.

В зеленой массе под нагрузкой возникают указанные виды деформаций. Чтобы разделить полную деформацию массы на составляющие части, производят разгрузку и измеряют восстанавливающиеся деформации.

На рис. 2. показан характер процесса парастания во времени деформации уплотнения и разуплотнения для образца трав. Аналогичный характер процесса

уплотнения наблюдался и в опытах с другими значениями влажности и уплотняющей нагрузки.

После приложения статической нагрузки небольшой величины возникают упругие деформации, масса работает в упругой или почти упругой стадии. В процессе упругих деформаций не происходит заметного смещения структурных агрегатов, а только наблюдается изгиб отдельных структурных элементов. После снятия нагрузки деформации в течение короткого промежутка времени полностью восстанавливаются. При увеличении времени действия нагрузки длительность процесса восстановления деформаций возрастает. При больших нагрузках, даже кратковременных, происходит смещение структурных элементов, сопровождающееся интенсивным отжатием воздуха из пор. Доля упругих деформаций уменьшается, а деформаций с последствием возрастает.

Исследования, проведенные П.К. Черником [8] с торфами, которые можно принять за аналог массы измельченных трав, показали, что истинные упругие деформации для торфов составляют незначительную долю, и их практически трудно выделить. Деформации, возникающие в процессе разгрузки, которые можно зафиксировать по индикаторам часового типа, являются мгновенно восстанавливающимися. При кратковременном действии уплотняющей нагрузки стабилизация восстанавливаемых деформаций наступает сравнительно быстро. С увеличением времени действия уплотняющей нагрузки возрастает и длительность процесса восстановления деформаций. Аналогичный характер деформаций наблюдается и при действии нагрузки на массу измельченных трав. Упругие деформации в массе измельченных трав в значительной степени связаны с размером частиц (длиной резки). При увеличении их длины при одинаковой влажности травы величина мгновенно восстанавливаемых деформаций возрастает. Это свидетельствует о том, что они связаны в основном с изгибом отдельных структурных элементов.

Исследования академика П. А. Ребиндера [9] с различными материалами свидетельствуют о том, что в большинстве случаев восстанавливающиеся деформации по своей природе не являются упругими.

Возникновение их не связано с перемещением элементов кристаллической решетки слагающих материал частиц, а вызвано изменениями толщины водных пленок, обволакивающих частицы и имеющих различные формы связи. Для зеленой массы трав это положение относится не к пленкам воды между отдельными структурными агрегатами (частицами травы), а к пленкам воды между элементарными частицами, из которых состоят эти структурные агрегаты и которые содержат на поверхности пленки воды различной толщины и разной формы связи с твердой частицей.

Для перемещения молекул воды от контактов между элементарными частицами в сторону пор под действием уплотняющей нагрузки и в обратном направлении при разгрузке требуется некоторое время.

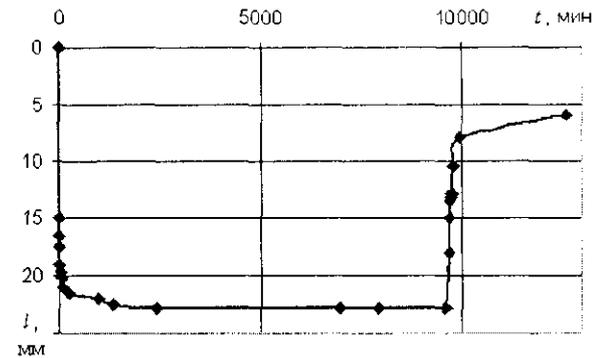


Рис. 2. Деформация уплотнения и разуплотнения массы из измельченных трав при $P = 0,015 \text{ МПа}$, $\rho_0 = 0,37 \text{ т/м}^3$, $W = 0,67$

Этим и можно объяснить процесс восстановления деформаций во времени (рис. 2).

Для трав снижение упругих свойств и увеличение доли остаточных деформаций может происходить в результате разложения массы и соковыделения при несоблюдении требований к технологическим процессам и в первую очередь при длительном заполнении хранилищ и допущении сильного разогревания массы в результате биологических процессов.

На рис. 2 показан характер процесса уплотнения зеленой массы измельченных трав во времени в лабораторных опытах в одометрах, а на рис. 3 — в опытных траншеях при различной влажности массы и различной величине уплотняющей нагрузки. Как следует из приведенных данных, в момент приложения нагрузки происходит практически мгновенное уплотнение массы на значительную величину. Затем процесс уплотнения продолжается во времени с постоянно уменьшающейся скоростью, но не прекращается, а протекает практически бесконечно. Характер процесса уплотнения измельченных трав под действием статической нагрузки аналогичен описанному выше характеру деформирования большинства материалов и в первую очередь торфяных грунтов.

Величина деформации уплотнения зависит от нагрузки, влажности массы, длины резки и мощности уплотняемого слоя.

На рис. 4 показана зависимость относительных значений мгновенных деформаций l_n к толщине уложенного и предварительно уплотненного слоя массы измельченных трав h_0 в опытных траншеях от величины уплотняющей статической нагрузки (зависимость 1).

Как следует из приведенных данных, величина $\frac{l_n}{h_0}$

зависит в основном от уплотняющей нагрузки, а также от плотности массы, достигнутой к моменту приложения статической нагрузки.

В производственных условиях при разравнивании массы бульдозером происходит ее уплотнение. Так как интенсивность этого процесса наибольшая при первых проходах по одному следу уплотняющего механизма (рис. 1), то достигнутая при этом плотность массы

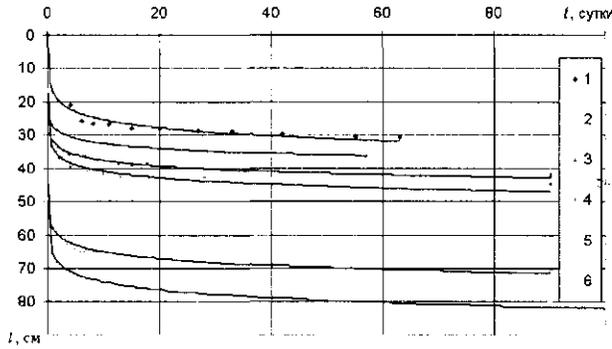


Рис. 3. Изменение деформаций уплотнения l в опытных траншеях зелёной массы с различной влажностью W во времени при различных значениях уплотняющей нагрузки P : 1 – $W = 1,14$, $P = 0,0053$ МПа; 2 – $W = 1,48$, $P = 0,0066$ МПа; 3 – $W = 1,16$, $P = 0,0038$ МПа; 4 – $W = 1,164$, $P = 0,006$ МПа; 5 – $W = 0,965$, $P = 0,0088$ МПа; 6 – $W = 0,965$, $P = 0,012$ МПа.

в различных траншеях отличается незначительно. Поэтому она не оказывает определяющего влияния на значения параметра $\frac{l_H}{h_0}$, так же, как и влажность массы, о чем свидетельствуют небольшие отклонения экспериментальных данных от функциональной зависимости представленной на рис. 4 (зависимость 1), которую на участке от $P = 0$ до $P = 0,015$ МПа можно принять линейной:

$$\frac{l_H}{h_0} = kP, \quad (6)$$

где k – постоянный коэффициент, равный тангенсу угла наклона прямой линии ($k = 15$). Дисперсия – 0,0035, корреляционное отношение – 0,9717.

Деформация уплотнения (ползучести) для любого момента времени t определяется по формуле:

$$\frac{l_i}{h_0} = kP(t + 1)^{\left(\frac{P}{0,001}\right)^c}, \quad (7)$$

Полученная формула справедлива в диапазоне нагрузок до 0,015 МПа. При больших значениях P величина параметра $\frac{l_H}{h_0}$ будет отклоняться от принятой зависимости в сторону уменьшения. Однако указанного диапазона достаточно для практических расчетов, так как большие значения уплотняющей статической нагрузки, чем $P = 0,015$ МПа, принимать для уплотнения силосуемой массы нецелесообразно, так как при любых значениях влажности массы нагрузка $P = 0,015$ МПа обеспечивает уплотнение, превышающее плотность массы для других известных технологий и обеспечивает получение качественного корма.

На рис. 4 (зависимость 2) показана зависимость $\frac{l_H}{h_0}$ от уплотняющей статической нагрузки P для массы измельченных трав при насыпной плотности, то есть без предварительного уплотнения, осуществляемого при разравнивании массы в заполняемой траншее. Как

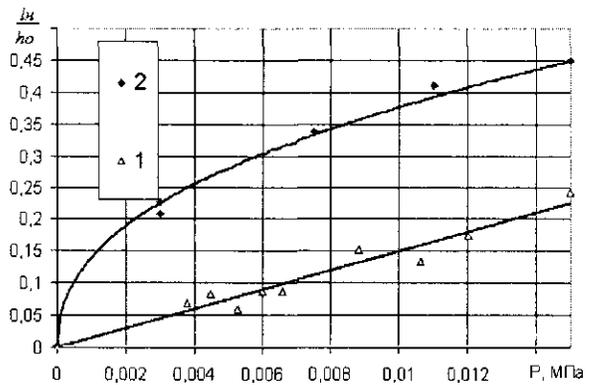


Рис. 4. Зависимость отношения значений мгновенных деформаций l_n к начальной толщине уплотняемого слоя h_0 массы измельченных трав от величины уплотняющей нагрузки P в опытных траншеях: 1 – при разравнивании и уплотнении укладываемой массы трактором; 2 – то же, но при насыпной плотности массы без уплотнения трактором.

следует из приведенных данных, величина мгновенных деформаций l_n в данном случае значительно превышает аналогичные значения для предварительно уплотненной при разравнивании массы при равных значениях уплотняющей нагрузки. Интенсивность же процесса нарастания деформаций во времени (ползучести), характеризуемая величиной параметра a , практически одинакова как для рыхлой, так и предварительно уплотненной массы при заполнении траншей.

Приведенные на рис. 4 (зависимость 2) данные свидетельствуют о том, что и для рыхлой массы величина мгновенных деформаций зависит от уплотняющей нагрузки P . Численные значения параметров этой зависимости не устанавливались, так как она получена по ограниченному количеству экспериментальных данных, а также из-за того, что заполнить траншею без предварительного уплотнения (с насыпной плотностью) невозможно, то есть она не представляет практического интереса, а лишь иллюстрирует характер процесса уплотнения.

Показатели свойств массы измельченных трав в опытных траншеях перед приложением уплотняющей статической нагрузки и значения параметров a и $\frac{l_H}{h_0}$ получены по результатам обработки данных наблюдений. Для контроля и управления процессом силосования необходимо знать не только деформации уплотнения, но и плотность массы в любой момент времени. Плотность массы перед приложением уплотняющей (статической) нагрузки:

$$\rho_0 = \frac{M}{V}, \quad (8)$$

где M – вес уложенной в хранилище массы, т; V – объем уложенной массы, м³.

Плотность массы ρ_t в любой момент времени t , после приложения уплотняющей нагрузки вычисляется по величине деформации l_t , достигнутой к рассма-

триваемому моменту времени:

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{1}{1 - \frac{h_1}{h_0}}, \quad (9)$$

в которой $\frac{h}{h_0}$ определяется по формуле (7).

Выводы

1. Проведенные исследования в лабораторных и производственных условиях показали, что реологические свойства зеленой массы измельченных трав аналогичны свойствам многих материалов, а наиболее близким аналогом являются биогенные грунты. Закономерности уплотнения и разуплотнения, а также релаксации напряжений для массы измельченных трав совпадают с соответствующими закономерностями для биогенных грунтов.

2. На основании исследований реологических свойств зеленой массы измельченных трав в лабораторных условиях, которые возможно проводить для каждого опыта лишь в течение ограниченного промежутка времени, и данных наблюдений в течение длительного промежутка времени в производственных условиях в опытных траншеях, а также используя результаты длительных опытов с биогенными грунтами, которые можно принять в качестве аналога для массы измельченных трав, получены расчетные зависимости для описания процесса уплотнения зеленой массы под действием статической нагрузки во времени.

3. Значения расчетных реологических параметров в полученных формулах зависят от величины уплотняющей нагрузки и структурных характеристик любого материала, в том числе и зеленой массы измельченных трав. Определяющим же фактором является величина уплотняющей нагрузки, все остальные факторы оказывают не столь существенное влияние на эти параметры для любых материалов. Поэтому, несмотря на то, что структурные характеристики массы измельченных трав и биогенных грунтов изменяются в достаточно широком диапазоне, значения расчетных параметров и диапазон изменения для них существенно не отличаются.

4. Используя полученные зависимости, можно рассчитать степень уплотнения силосуемой массы в хранилище на любой момент времени, а соответственно и содержание в ней воздуха, что позволяет управлять процессом силосования путем назначения величины

уплотняющей нагрузки в зависимости от показателей физических свойств и структурных характеристик укладываемой массы.

5. Длина резки материала является основной технологической характеристикой и существенно влияет на величину насыпной объемной массы, поэтому для достижения высокой начальной плотности стебельной массы (что особенно важно при заготовке сенажа) необходимо обеспечить длину резки порядка 10...20 мм. Эффективность процесса уплотнения зависит от влажности массы, от длины резки и массы уплотняющего механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колтушкин И.С. Исследование стебельной массы растений как пористого материала в технологических процессах заготовки кормов: Автореф. дис... канд. техн. наук. Горки, 1987. – 17 с.

2. Грачев А.В. Способы и технические средства повышения эффективности обработки силосуемой массы химическими консервантами: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1987.

3. Гвоздев А.В. Разработка внутрикамерного процесса и обновление параметров устройства для внесения жидких консервантов при формировании растительной массы в рулоны: Автореф. дис... канд. техн. наук. Глеваха, 1990.

4. Механико-технологические основы консервирования стебельчатых кормов: Монография / СХА; А.В. Кузьмицкий. — Горки, 1999. – 30 с.

5. Кузьмицкий А.В. Технология инъекционного внесения жидких консервантов при силосовании кормов. – Информационный листок №31-85. Могилев: БелНИИ НТИ, 1985.

6. Черник П.К., Основин С.В. Релаксация напряжений. //Современные энерго-и ресурсосберегающие технологии и системы сельскохозяйственного производства: Сб. науч. трудов. – Рязань: РГСХА, 2003, – вып. 7, ч. 2. – С. 178 – 181.

7. Хархута Н.Я., Иевлев В.М. Реологические свойства грунтов. – М.: Автотрансиздат, 1961. – 63 с.

8. Черник П.К. Исследование процессов уплотнения и разуплотнения торфа: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 20. 01. Минск, 1970. – 18 с.

9. Ребиндер П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 124 с.

Редакция журнала «Агропанорама»

приглашает к сотрудничеству представителей академической, вузовской, отраслевой науки и производства.

Надеемся, что ваши докторанты, аспиранты, соискатели и магистранты станут подписчиками нашего издания и авторами статей.

Рассмотрим предложения по выпуску специальных номеров журнала «Агропанорама».

Телефоны редакции: 267-22-14; 267-30-12.