

УДК 676.012.1-50

## **ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ И ОБРУШЕНИЯ СВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ**

© *В.П. Сиваков, проф., д-р. техн. наук*

*М.Ю. Голынский, канд. техн. наук*

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, 37,

г. Екатеринбург, Россия, 620100

E-mail: golynsk@rambler.ru

Технологическая щепка рассматривается как подвижный связный агрегат макрочастиц. Для анализа свойств технологической щепы применена модель эффективной сплошной среды. Основным уравнением, определяющим поведение щепы является реологическое. На основе этого уравнения показано, что по периметру корпуса бункера, в направлении к его вертикальной оси, концентрично формируются области упругости, предельного состояния, ползучести, аномального трения и кулонова трения. Длительное хранения щепы в бункере способствует увеличению пристенных областей (упругости и ползучести) и сокращению центральных областей (аномального трения и кулонова трения). В конической части бункера при выгрузке поток щепы сужается, значительно возрастает радиальное давление, что приводит к образованию динамически неустойчивых сводов.

Изменение плотности технологической щепы исследовано в экспериментальном бункере в зависимости от времени хранения, высоты столба щепы и влажности. На основе полученных данных скорректирована формула Янсена для расчета давления на днище и стенки бункера. Формула Янсена дает заниженные значения давления из-за неучета влияния фактора времени на изменение плотности щепы. Расчет осевых и радиальных давлений на стенки и днище бункера по уточненной формуле подтверждается экспериментальными измерениями. Установлено, что бункеры необходимо проектировать с меньшим углом наклона конического днища бункера к вертикали или с устройствами, препятствующими образованию сводов. Прогнозирование образования и развития областей различных динамических состояний щепы в бункере позволяет конструировать устройства для предотвращения образования сводов щепы. Использование бункеров высотой от 15 м не приведет к увеличению частоты образованию сводов, но позволит увеличить аккумулирующие мощности предприятия.

*Ключевые слова:* бункер, щепка, сводообразование.

Технологическая щепка представляет собой подвижный связный агрегат макрочастиц сплошного материала, находящихся между собой в механическом контакте в газовой среде. Существующие механические модели не дают адекватного описания механического поведения щепы. Модельные представления щепы являются феноменологическими или искусственными, что обуславливает их ограниченную применимость.

К специфическим особенностям механики щепы при движении в бункере можно отнести зависимость динамического состояния щепы от параметров внешних механических воздействий в рамках одной задачи; замкнутость

объемов, заполненных щепой; неприменимость равенства нулю объемных деформаций.

Существующие модели сыпучих тел могут быть разделены на несколько классов: точечные, статистические, эффективные сплошные и специальные [1, 6, 8]. Рассматриваемая ниже модель щепы строится как модель эффективной сплошной среды с соответствующим образом определенными динамическими величинами и константами, входящими в систему уравнений. Представление щепы как эффективной сплошной среды дает описание ее механического поведения во всем диапазоне внешних нагрузок и граничных условий. Система уравнений сплошной среды включает уравнения импульса, непрерывности, энергетического баланса, реологическое [1]. При этом формально вид первых трех уравнений одинаков для любой сплошной среды. Основным уравнением, определяющим особенности щепы, является реологическое уравнение.

Реологическое уравнение сыпучего материала, а следовательно, и технологической щепы построено как соотношение между напряжением в щепе и скоростью ее перемещения. В общем виде график зависимости напряжения в щепе  $\sigma_{zx}$  от скорости ее перемещения  $v_x$  представлен на рис. 1 [1, 8]. Зависимость  $\sigma_{zx}(v_x)$  является нелинейной, имеет один максимум, два участка возрастания, по одному убывания и неизменности  $\sigma_{zx}(v_x)$  с ростом  $v_x$ . В соответствии с этим, шкала скоростей  $v_x$  подразделяется на 4 участка: OA, AB, BC, CD.

Участок OA – область резкого возрастания напряжения  $\sigma_{zx}$  – на этом участке сверхмалым скоростям соответствуют очень высокие значения вязкости сплошного массива щепы. Существованием этого участка объясняется эффект ползучести – сверхвязкое течение сплошного массива щепы со сверхмалыми скоростями под действием постоянной нагрузки.

Участок AB – область аномальной вязкости сплошного массива щепы – на этом участке с увеличением скорости напряжение сопротивления падает. Это область, где происходят интенсивные структурные изменения в объеме щепы, – лавинообразный процесс ослабления межчастичных контактов, среда становится текучей. В т. В, когда напряжение сопротивления достигает минимума, «включается» механизм преобразованного сухого трения, поэтому в

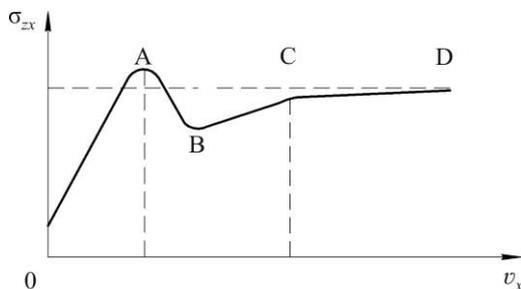


Рис. 1. Зависимость напряжения в щепе  $\sigma_{zx}$  от скорости ее перемещения  $v_x$

окрестностях этой точки имеют место два конкурирующих эффекта: резко снижающееся напряжение покоя и возрастающее напряжение кулонова скольжения. Этим объясняется наличие минимума.

Участок BC – при дальнейшем росте скорости в этой области имеется возрастающая практически линейная зависимость  $\sigma_{zx}(v_x)$ . Здесь щепка ведет себя как эффективная линейная вязкая квазизжидкая среда.

Участок CD – область чисто кулонова трения – на этом участке напряжение не зависит от скорости.

При движении в объеме сплошного массива щепы будут одновременно существовать области кулонова трения, вязкого и аномального трения, ползучести и тонкий слой предельного состояния. При этом последний является границей двух фаз массива щепы: текучей и упругой.

В силу непрерывности зависимости  $\sigma_{zx}(v_x)$  пространственные области различных динамических состояний массива щепы (рис. 2) расположены так, что область кулоновой среды 1 окружена областью вязкой среды 2, которая, в свою очередь, отделена от области ползучести 4 областью аномальной вязкости 3. Область 4 отделена от области упругости 6 областью предельного состояния 5.

При истечении технологической щепы из бункера (рис. 3) возникает такое напряженное состояние в выгрузочном днище или в переходной зоне от верхней части бункера к выгрузочному днищу, при котором вертикальное давление начинает уменьшаться. Затем главные нормальные напряжения сравниваются по величине и вертикальное давление становится меньше горизонтального. Горизонтальные усилия уплотняют частицы материала, растут силы сцепления, которые уменьшают скорость движения щепы. При дальнейшем росте горизонтального давления силы сопротивления превышают силы от вертикального давления, истечение сыпучего материала прекращается, образуется свод. К основным факторам сводообразования относятся объемный вес сыпучего материала, время хранения, высота столба насыпного материала в бункере, влажность и др.

Хранение массива технологической щепы сопровождается изменением его плотности. После длительного хранения существенно изменяется соотношение между областями различных динамических состояний массива щепы. Поперечное сечение пристенных областей 4 – 6 увеличивается, соответственно, области 1 – 3 отсутствуют или существенно уменьшаются в поперечном сечении.

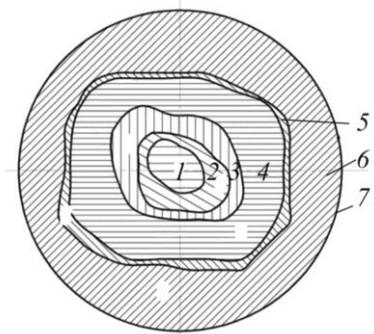
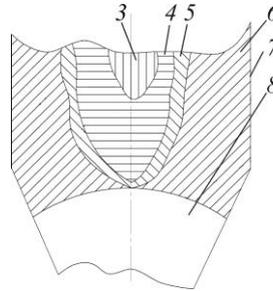


Рис. 2. Пространственные области различных динамических состояний массива щепы в бункере (7): 1 – область кулоновой среды; 2 – вязкой среды; 3 – аномальной вязкости; 4 – ползучести; 5 – предельного состояния; 6 – упругости

Рис. 3. Расположение областей динамических состояний массива щепы при образовании динамически неустойчивого свода щепы (8) (см. обозначения на рис. 2)



В выгрузочном днище бункера образуется динамически неустойчивый свод из-за стремления зон 1 – 3 к нулю (рис. 3).

Процесс увеличения поперечного сечения областей 4 – 6 тем интенсивней, чем выше столб насыпного материала над рассматриваемым поперечным сечением. Скорость нормального истечения щепы замедляется, расход выгружаемой щепы снижается. Динамически неустойчивый свод кратковременен, так как инерция движущихся расположенных выше слоев сырья разрушает его. Образование и разрушение динамически неустойчивого свода создает пульсирующий поток выгрузки сырья. При перекрытии областями 5, 6 всего поперечного сечения бункера образуется статический свод, при котором выгрузка щепы прекращается. Разрушение статического свода трудоемкая процедура.

Даже в нормальном режиме истечения, когда частота образования динамически неустойчивого свода мала, происходит монотонное уменьшение областей 1 – 3. При снижении наружного радиуса области 3 меньше критического радиуса в конической части бункера происходит резкое зарастание поперечного его сечения областями 5, 6 с образованием статического свода. Движущийся поток заужается пропорционально увеличению горизонтального (радиального) давления  $p_R$ . В конической части происходит значительное приращение радиального давления (рис.

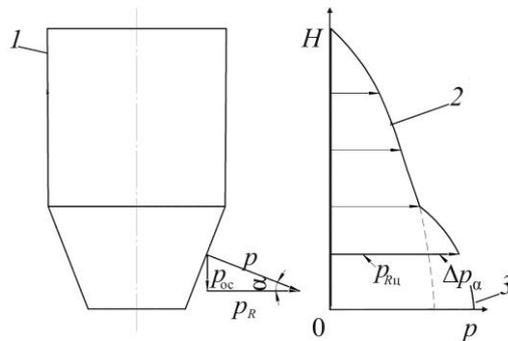


Рис. 4. Приращение радиального давления в конической части бункера: 1 – бункер; 2 – эпюра давления в цилиндрической части бункера; 3 – эпюра давления в коническом днище

4), что сопровождается ускоренным сужением областей 1 – 3 и приводит к образованию динамически неустойчивых сводов.

Эпюра давления в бункере получена по результатам многофакторного эксперимента [2]. В экспериментальном бункере исследовалось изменение плотности технологической щепы от времени хранения, высоты столба

насыпного материала и влажности. Получены уравнения линейной регрессии. Эти данные помогли скорректировать формулу Янсена для определения давления на стенки и днище бункера, которая не учитывала изменение плотности щепы во время хранения и поэтому давала заниженные значения [3, 7]. Давление в бункере в зависимости от высоты столба насыпного материала  $H_0$  и времени хранения  $t_0$  изменяется согласно следующим зависимостям:

$$p_{oc} = \frac{(\rho_0 + (29,35 + 1,14 \ln t_0) \ln H_0 F g)}{fKL} \left( 1 - e^{-\frac{fKL}{F} H} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность сыпучего материала;

$H_0$  – высота сыпучего материала в бункере;

$F$  – площадь горизонтального сечения бункера;

$g$  – ускорение свободного падения;

$f$  – коэффициент трения сыпучего материала о стенки сосуда;

$K$  – коэффициент бокового давления, определяющий отношение горизонтального давления  $p_{рад}$  на вертикальную стенку к вертикальному давлению  $p_{oc}$  на горизонтальную площадку;

$L$  – периметр сечения бункера.

Определим радиальное давление на коническое днище:

$$p_{Rк} = K p_{oc}; \quad (2)$$

$$p_{Rк} = p_{oc} \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол наклона конической части бункера к вертикали.

Радиальное давление на коническое днище (рис. 4) можно представить в следующем виде:

$$p_{Rк} = p_{Rц} + \Delta p_{\alpha}, \quad (4)$$

где  $p_{Rц}$  – радиальное давление для цилиндрической части корпуса;

$\Delta p_{\alpha}$  – приращение давления в коническом днище.

Подставив (3) в формулу (4), получим приращение давления в коническом днище бункера:

$$\Delta p_{\alpha} = p_{oc} \cos \alpha - p_{Rц}. \quad (5)$$

В связи со значительным приращением давления, согласно зависимости (5), бункеры необходимо проектировать с меньшим углом наклона конического днища к вертикали или использовать устройства, препятствующие образованию сводов [4, 5]. Как показано на рис. 4, давление в цилиндрической части асимптотически стремится к какому-то постоянному значению. Следовательно, увеличение высоты бункера не сопровождается значительным ростом радиального давления на стенки бункера. Использование бункеров высотой от 15 м не приведет к увеличению частоты образованию сводов, но позволит увеличить аккумулирующие мощности предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
2. Голынский М.Ю., Сиваков В.П. Некоторые вопросы уплотнения технологической щепы при ее хранении в бункерах // Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: моногр. / Под ред. А.А. Санникова, Н.В. Куцубиной. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. С. 180.
3. Мазарский С.М. Силосные склады древесной щепы. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1971. 41 с.
4. Пат. 57288 РФ, В 65 D 88/64. Тарельчатый питатель / Сиваков В.П., Голынский М.Ю. № 2006107201/22; заявл. 07.03.2006; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. 3 с.
5. Пат. 58518 РФ, В 65 D 88/64. Бункер / Сиваков В.П., Голынский М.Ю. № 2006118842/22; заявл. 30.05.2006; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33. 3 с.
6. Ротенберг А.В. Применение аппарата классической статистики в равновесной механике дискретных сред // Технологии и системы обработки информации и управления. Пенза: ПГУ, 1999. Вып. 2. С. 72.
7. Сиваков В.П., Голынский М.Ю. Определение давления щепы на днище и стенки бункера // Вестн. КГТУ. 2013. № 15. С. 42.
8. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высш. шк., 1969. 608 с.

Поступила 17.01.12

**The Physics of Chip Arch Formation and Breaking-Down**

*V.P. Sivakov – Professor, Doctor of Engineering*

*M.Yu. Golynsky – Candidate of Engineering*

The Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37,  
Yekaterinburg, 620100, Russia

E-mail: golynsk@rambler.ru

Pulp chip is considered in the article as a coherent mobile unit of macroparticles. To analyze the properties of pulp chips we used a model of effective continuum. We show that the main equation defining the behaviour of chips is the rheological one. Using this equation, we demonstrate that along the perimeter of the bunker case towards its vertical axis, there concentrically are formed elastic, limit state, creep, abnormal friction and Coulomb friction areas. Long term storage of chips in the bunker makes the wall areas (elasticity and creep) increase and the central areas (abnormal friction and Coulomb friction) reduce. In the bunker's conic part at discharge, the chip flow becomes narrower and the radial pressure increases significantly, leading to formation of dynamically unstable arches. We studied the changing density of chips in a prototypical bunker depending on the storage time, height of the chip column and moisture content. Based on the data obtained, we modified Janssen's equation to calculate the pressure on the bottom and walls of the bunker. Jansen's equation gives too low pressures as it does not take into account the influence of time on chip density. The axial and radial pressures on the walls and bottom of the bunker calculated by the modified equation are confirmed by experimental measurements.

Bunkers must be designed with a smaller tilt angle between the bunker's conic bottom and the vertical or the devices preventing the formation of arches. Prediction of for-

mation and development of the various regions of chip dynamical states in the bunker makes it possible to design a device preventing the chip arches from forming. Using 15 m high bunkers will not result in more frequent formation of arches, but will increase the accumulating capacity of the enterprise.

*Keywords:* bunker, chips, arching.

#### REFERENCES

1. Vyalov S.S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological Fundamentals of Soil Mechanics]. Moscow, 1978. 447 p.
  2. Golynskiy M.Yu., Sivakov V.P. Nekotorye voprosy uplotneniya tekhnologicheskoy shchepy pri ee khraneni v bunkerakh [Some Issues of Pulpchip Compaction for Storing in Bunkers]. *Vibrodiagnostika, tribotekhnika, vibratsiya i shum* [Vibrodiagnostics, Tribo-Engineering, Vibration and Noise]. Yekaterinburg, 2009, p. 180.
  3. Mazarskiy S.M. *Silosnye sklady drevesnoy shchepy* [Silo Bins for Wood Chips]. Moscow, 1971. 41 p.
  4. Sivakov V.P., Golynskiy M.Yu. *Tarel'chatyy pitatel'* [Plate Feeder]. Patent RF, no. 57288, V 65 D 88/64. 2006.
  5. Sivakov V.P., Golynskiy M.Yu. *Bunker*. Patent RF no. 58518, V 65 D 88/64. 2006 (in Russian).
  6. Rotenberg A.V. Primenenie apparata klassicheskoy statistiki v ravnovesnoy mekhanike diskretnykh sred [The Use of Classical Statistics in Equilibrium Mechanics of Discrete Media]. *Tekhnologii i sistemy obrabotki informatsii i upravleniya* [Technologies and Systems of Information Processing and Management]. Penza, 1999. Iss. 2, p. 72.
  7. Sivakov V.P., Golynskiy M.Yu. Opredelenie davleniya shchepy na dnishche i stenki bunkera [Calculation of the Wood Chips Pressure on the Bottom and Walls of the Bunker]. *Vestnik KGTU*, 2013, no. 15, p. 42.
  8. Sokolovskiy V.V. *Teoriya plastichnosti* [Plasticity Theory]. Moscow, 1969. 608 p.
-