

УДК 664.724:539.215.9:620.172.254

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕСТА УСТАНОВКИ ТЕРМОПОДВЕСОК В БУНКЕРЕ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ НА ИХ СИЛУ НАТЯЖЕНИЕ

Д.И. Борисенко

*Московский государственный университет
технологий и управления им.К.Г.Разумовского, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Для измерения поля температуры в сыпучей среде, склонной к саморазогреванию, применяются термоподвески. В статье рассматривается практическая задача натяжения термоподвесок, при истечении сыпучей среды из бункеров. Излагается методика исследования натяжения подвесок в вертикально ориентированной емкости при истечении из нее сыпучей среды. Приводится описание экспериментального стенда. Стенд моделирует пропорционально уменьшенную нижнюю часть реального бункера, наиболее опасную в плане возникновения саморазогревания. В качестве модельной среды для моделирования реальной зерновой массы пшеницы взята манная крупа. Описываются проведенные эксперименты по

исследованию натяжения подвесок в лабораторных условиях при истечении сыпучей среды из модели насыпного бункера. Проводится анализ полученных данных. Приводятся результаты экспериментов по исследованию связи силы натяжения термоподвесок и места их расположения в бункере при истечении сыпучей среды. При закреплении подвесок на разных расстояниях от оси симметрии емкости в них возникают различные растягивающие усилия. Различия выражаются в величине силы натяжения и их динамике. На временных зависимостях сил натяжения подвесок наблюдается максимум. Положение максимумов на этих зависимостях смещается в сторону больших значений времени с увеличением расстояния от центра емкости.

ВВЕДЕНИЕ

Зерновые материалы являются основой питания населения, как в нашей стране, так и во всем мире [1]. Одной из причин порчи зерна и продуктов его переработки при хранении является саморазогревание [2]. Кроме порчи самого хранимого зерна в результате саморазогревания выделяются вредные газы, загрязняющие окружающую среду. Для проведения соответствующих мероприятий по минимизации негативного воздействия саморазогревания на зерновую массу необходимо своевременно выявлять его очаги. Для этого в свою очередь необходимо контролировать пространственно-временное распределение температуры в зерновой массе. Для этого применяются специальные приспособления – термоподвески. При истечении хранимого сыпучего продукта из бункера термоподвеска под воздействием движущейся сыпучей среды отклоняется от вертикального положения. При этом датчики, установленные в нижней части подвески, сдвигаются к центру бункера (рис. 1).

Поскольку «наиболее быстро самонагреваются слои комбикормов, расположенные на высоте 1,5–2

диаметра (ширины) силоса от нижнего разгрузочного бункера» а также «больше всего возникает пожаров в конусной части силосов» [3] важно, чтобы измерения температуры именно в этой части бункера были максимально достоверны. Но, если при отклонении термоподвески датчики именно в нижней части бункера сдвигаются на максимальное расстояние, то получается, что самая опасная зона зерновой массы остается без должного контроля. Заметим, что сигналы с датчиков при этом продолжают исправно поступать на регистрирующие приборы и честно показывать значения параметров окружающей зерновой массы. Беда в том, что чувствительные элементы уже находятся не в расчетных координатах, а смещены к центру бункера. Таким образом, безопасность страдает, и сам факт нахождения термодатчиков в зерновой массе теряет смысл.

явление мультипликации усилия, направленного вдоль протяженного объекта (стержня или нити), вызванного поперечной нагрузкой, при малых углах между вектором нагрузки и перпендикуляром к протяженному объекту. Механизм этого явления следующий. Усилие в протяженном объекте (стержне

или нити) равно нагрузке в поперечном оси объекта направлении, разделенной на синус угла между осью объекта и перпендикуляром к вектору нагрузки:

$$F_2 = F_1 / \sin \alpha,$$

где F_2 – растягивающее усилие в термоподвеске;
 F_1 – нагрузка, действующая поперечно протяженному объекту;
 α – угол между усилием F_2 и перпендикуляром к нагрузке F_1 .

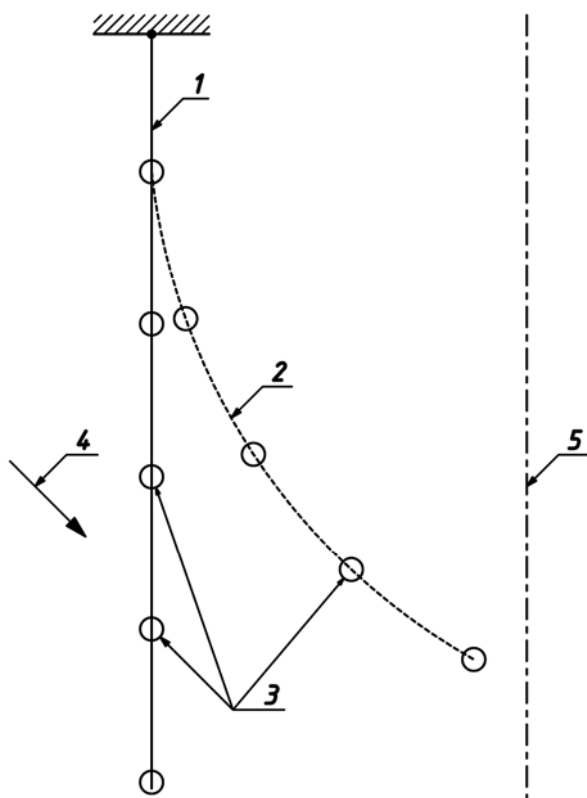


Рис. 1 Отклонение термоподвески со свободным нижним концом под действием истекающей сыпучей среды: 1 – исходное (вертикальное) положение; 2 – отклоненное положение; 3 – чувствительные элементы; 4 – направление истечения сыпучей среды в бункере; 5 – ось бункера.

Чтобы предотвратить отклонение термоподвесок от вертикального положения, их нижний конец можно закрепить к дну бункера (его конической части). В этом случае при истечении сыпучей среды наблюдается

Поскольку в нашем случае поперечной нагрузкой является воздействие, вызванное истечением сыпучей среды, угол α – это угол отклонения

подвески относительно исходного положения (рис. 2).

У современных термоподвесок прочность на разрыв довольно высока – до 30 кН (3 тонны) [например, 4], но на деле даже ее не всегда оказывается достаточно. Растягивающие усилия в закрепленных снизу термоподвесках приводят к их разрыву. Истечению сыпучих сред из бункеров посвящены специальные исследования [5], однако, вопрос натяжения подвесок в истекающей среде остается открытым.

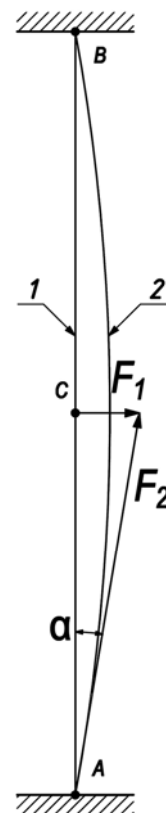


Рис. 2 Отклонение термоподвески с закрепленным нижним концом под действием истекающей сыпучей среды: 1 – исходное (вертикальное) положение; 2 – отклоненное положение.

Для разработки технологий, позволяющих осуществлять контроль сигнальных параметров во всей толще сыпучего продукта, и особенно в самой опасной зоне – в нижней части бункера – требуются специальные исследования.

Чтобы начать разрабатывать соответствующие технологии необходимо понимать, равномерно ли распределены растягивающие усилия в одинаковых термоподвесках, расположенных в разных местах бункера, или они отличаются. На силу натяжения подвесок влияет окружающая их истекающая

сыпучая среда. Для определения усилий в подвесках нужно либо понимать происходящие вокруг них явления и уметь их количественно охарактеризовать в каждый момент времени либо провести физический эксперимент. В [6] разрыхленное состояние среды описывается условием прочности Мизеса – Шлейхера, а переход в пластическое состояние – условием текучести Мизеса, правда, для полубесконечной среды, что не очевидно применительно к реальным условиям. В [7] приводятся решения для напряжений, испытываемых

близкорасположенными стенками, что является противоположной крайностью. Насколько корректно строить математическую модель процесса, опираясь на указанные закономерности, покажет эксперимент.

Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное выяснение влияния места установки термодвусок в различных местах бункера на их силу натяжения при истечении сыпучего материала в лабораторных условиях, что является новым знанием.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для достижения поставленной цели следует ответить на вопрос: какова сила натяжения одной и той же подвески, расположенной в различных местах бункера? Для этого изготавливались три одинаковые подвески из стального троса в полимерной оболочке, располагавшиеся вертикально на заданном расстоянии от оси симметрии бункера. При этом нижние концы подвески шарнирно закреплялись к жестко фиксированным точкам на нижней конической части бункера на равных радиусах, расположенных под 120° между собой. Верхние концы подвесок через динамометры крепились к жестко зафиксированной заделке.

Исследование выполнялось в лабораторных условиях, поэтому использовался уникальный экспериментальный стенд, моделирующий пропорционально уменьшенную нижнюю часть реального силоса. Как указывалось выше, наиболее опасна часть бункера, включающая нижние 1,5–2 диаметра над выпускным сужением. Поэтому для своей установки мы выбрали форму рабочей емкости в виде вертикального цилиндра, переходящего в нижней части в конус с высотой цилиндрической части 3,5 диаметра.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

Макеты подвесок (1) через динамометры (2) закреплены к жесткому каркасу (3). В своих экспериментах мы использовали цифровые динамометры, работающие на пьезоэффекте, а потому не приводящие к сколько-нибудь заметному растяжению подвесок. Сыпучая среда загружается в моделирующую бункер рабочую емкость (4) с нанесенной на образующую линейной шкалой (5), откуда при открытии запорного механизма (6) по желобу (9) поступает в приемный короб (10), расположенный на весах (11). Показания динамометров (2), положение уровня свободной поверхности, отслеживаемое по шкале (5) и масса высыпающейся из рабочей емкости среды по показаниям весов (11) контролируется видеокameraми (7), в поле зрения каждой из которых попадают индикатор «своего» параметра и одни и те же часы (8). Для совмещения с часами в поле зрения

камеры, регистрирующей показания весов, циферблата последних используется системы зеркал. Строгая привязка ко времени позволяет синхронизировать силу натяжения всех подвесок с уровнем и интегральной плотностью истекающей среды.

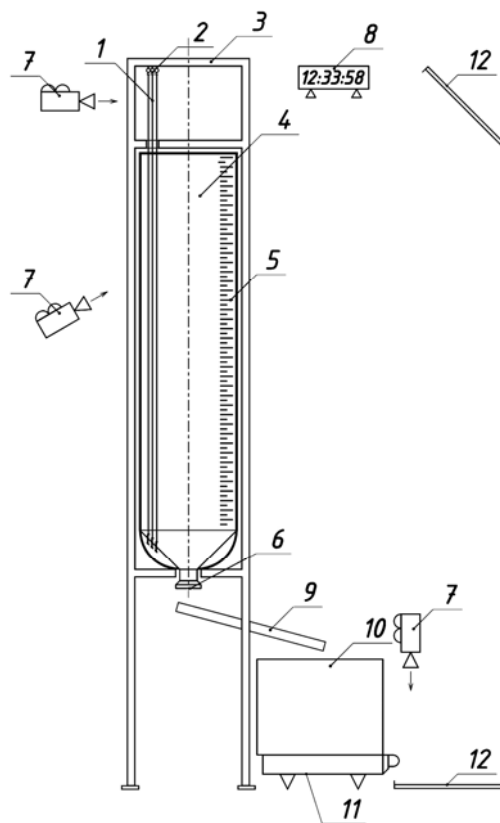


Рис. 3 Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – подвески; 2 – динамометры; 3 – жесткий каркас; 4 – рабочая емкость; 5 – мерная шкала; 6 – запорный механизм; 7 – видеокamera; 8 – часы; 9 – желоб; 10 – приемный короб; 11 – весы; 12 – зеркало.

Поскольку рабочая емкость в нашем стенде по линейным размерам (диаметр 270 мм) на порядок (в 10...40 раз) меньше реальных бункеров, то и толщины подвесок в экспериментах также должны быть на порядок меньше, чем у реальных термоподвесок. Диаметры ныне применяющихся термоподвесок варьируются от 8 до 60 мм – возьмем макеты подвесок диаметром 2 мм. Характерные размеры частиц сыпучей среды также должны быть пропорционально уменьшены. При этом важно, чтобы все ключевые характеристики модельной среды (насыпная плотность, скважистость, сжимаемость, теплофизические свойства) оставались идентичны характеристикам моделируемой среды. В качестве модельной среды для моделирования реальной зерновой массы пшеницы выбиралась манная крупа.

Последовательность проведения экспериментов.

Первая серия опытов. Подвески (1) устанавливаются вертикально на одинаковом расстоянии от оси симметрии рабочей емкости (4),

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные результаты просыпок, проведенных с подвесками, установленными на одинаковом расстоянии от оси симметрии рабочей емкости, и на разном, приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

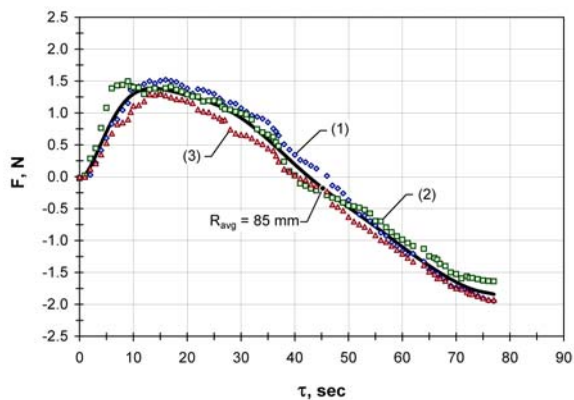


Рис. 4 Динамика силы натяжения подвесок, расположенных на одинаковом расстоянии от оси симметрии рабочей емкости, при истечении сыпучей среды: $R_1 = R_2 = R_3 = 85$ мм.

Как видно из приведенных графиков, при установке подвесок на одинаковом расстоянии от оси симметрии емкости изменения силы натяжения подвесок практически синхронны. При установке подвесок на разном расстоянии – наблюдается расхождение в зависимостях силы натяжения от времени, при этом кривые для подвески, не поменявшей положение, графики в обеих сериях опытов различаются между собой меньше, чем с

равном 85 мм в вершинах равнобедренного треугольника. Запорный механизм (6) закрывается. Рабочая емкость (4) заполняется сыпучей средой. Включается запись видеокамер. Включаются динамометры. Открывается запорный механизм. Происходит истечение сыпучей среды из рабочей емкости, осуществляется запись показаний индикаторов рабочих параметров. Отметим, что для достижения цели, поставленной в настоящей работе, достаточно зафиксировать силу натяжения подвесок в одни и те же моменты времени. По истечении всей модельной среды из емкости (4) запись останавливается. Запорный механизм закрывается. Цикл описанных манипуляций повторяется несколько раз для набора статистики.

Вторая серия опытов. Подвески устанавливаются вертикально на разном расстоянии от оси симметрии рабочей емкости: одна – на расстоянии 37 мм, вторая – 85 мм (остаётся непременной), третья – 118 мм. Далее осуществляется описанный выше цикл действий, идентичный первой серии опытов.

графиками силы натяжения подвесок, расположенных в других местах. Мы видим, что на всех зависимостях силы натяжения от времени имеются максимумы, однако выраженность и положение этих максимумов различны для разных мест установки подвесок. Для одновременного растяжения установленных в разных местах бункера подвесок наблюдается явное смещение максимума растяжения в сторону больших значений времени при увеличении расстояния от оси симметрии емкости. Нисходящие ветви кривых примерно параллельны, в то время как восходящие имеют явно различный наклон.

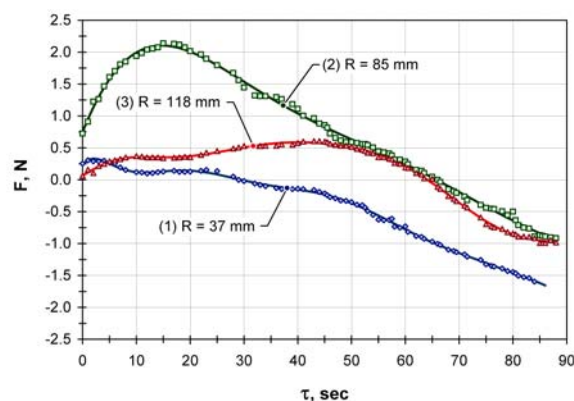


Рис. 5 Динамика силы натяжения подвесок, расположенных на разном расстоянии от оси симметрии рабочей емкости, при истечении сыпучей среды: $R_1 = 37$ мм; $R_2 = 85$ мм; $R_3 = 118$ мм.

ВЫВОДЫ

Впервые проведен лабораторный эксперимент по определению влияния места установки термоподвесок в бункере при истечении сыпучей среды. При закреплении подвесок на разных расстояниях от оси симметрии сосуда в них возникают различные растягивающие усилия. Различия выражаются как в абсолютных значениях, так и в динамике. На временных зависимостях силы натяжения вертикально закрепленных подвесок наблюдается максимум. Положение максимумов на этих зависимостях смещается в сторону больших значений времени с увеличением расстояния от оси симметрии сосуда. В дальнейшем планируется провести эксперименты с большим количеством

подвесок, подвесками различного диаметра и провести сопоставление с расчетными значениями.

Хочу отметить, что настоящая работа не была бы реализована, если не помощь коллег:

В.А. Азаренко, А.А. Аверченко, В.А. Богатырева, П.А. Богатырева, Н.С. Грибовой, З.К. Дзотцовой, Ю.А. Комиссаровой, И.В. Кузьмичева, А.А. Локтева и К.В. Меркулова.

Автор выражает им искреннюю благодарность за всестороннее участие в разработке и изготовлении экспериментального стенда, подготовке и проведении экспериментов, а также в обработке результатов и анализе опытных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подгорный С.А. Термовлагодомеханические процессы и перенос потенциалов тепла и массы при сушке зерновых материалов: Автореф. дисс... д.т.н. – Краснодар. – 2015. – 44 стр.
Podgorny, S.A., (2015) Termovlagomekhanicheskie protsessy i perenos potentsialov tepla i massy pri sushke zernovykh materialov [Heat-, moisture-mechanical processes and transfer of electric of potentials on grain drying]: Abstract of Doctoral Thesis, Krasnodar, 44 p.
2. Трисвятский Л.А. Хранение зерна. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
Trisvyatsky, L.A., (1985) Khranenie zerna [Grain storage], Moscow: Agropromizdat, 351 p.
3. Верзилин М.М., Повзик Я.С. Пожарная тактика. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА НПО», 2007. – 441 стр.
Verzilin, M.M. and Povzik, Ya.S., (2007) Pozharnaya taktika [Fire tactics], Moscow: ЗАО «SPETSTEKHNIKA NPO», 441 p.
4. ET910 multipoint temperature measurement, from https://evikon.ee/pdf/evikon/ET910_DS_EN.pdf
5. Решетнев Е.К. Истечение сыпучих материалов из бункеров складочных комплексов. М.: Наука, 1987. – 119 с.
Reshetnev, E.K., (1987) Istechenie sypuchikh materialov iz bunkerov zakladochnykh kompleksov [Discharging of granular materials from stowing plant bunkers], Moscow: Nauka, 119 p.
6. Садовская О.В., Садовский В.М./ К исследованию упругопластических волн в сыпучей среде// Прикладная механика и техническая физика 2003. Т.44, №5, стр. 168-176.
Sadovskaya, O.V. and Sadovsky, V.M., (2003) K issledovaniyu uprugoplasticheskikh voln v sypuchey srede [To investigation of elastic-plastic waves in granular media], Applied Mechanics and Technical Physics, vol.44, No.5, pp. 168-176.
7. А.В. Школа, А.А. Анискин, Солдо Божо/ Боковое давление анизотропных сыпучих сред на близкорасположенные крутые наклонные стенки. Решение осесимметричной и плоской задачи// Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництво). Вип. 4(34). Т2. – 2012. – ПолтНТУ. – С.141–148.
Shkola, A.V., Aniskin, A.A. and Bozho, Soldo, (2012) Bokovoe davlenie anizotropnykh sypuchikh sred na blizkoraspolozhennye krutye naklonnye stenki. Reshenie osesimmetrichnoy i ploskoy zadachi [Lateral pressure of anisotropic granular media on closely spaced steep sloped walls. Solution of an axisymmetric and plane problems], Collection of scientific papers (branch engineering and construction), 4(34), vol. 2., Poltava national technical university, pp.141-148.