

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НОРИИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ СВОЙСТВАМИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КОВШЕЙ

Хобин В.А. д.т.н., проф. Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
Кирызов И.Н., компания С-инжиниринг, г. Одесса

Обоснована актуальность математического моделирования нории для разработки систем оптимального управления загрузкой поточно-транспортных линий. Проведена структуризация модели нории и разработана модель процесса заполнения ее ковшей сыпучим материалом, наиболее сложная в комплексе моделей.

The mathematical modelling bucket elevator urgency for system optimum control engineering by continuous-transport lines loading is proved. The model bucket elevator structurization is carried out and process of filling of its ladles model by a loose material (the most complex in a models complex) is developed.

Ключевые слова: нория, поточно-транспортная линия, загрузка, оптимальное управление, математическая модель, заполнение ковшей.

1. Принципиально важные особенности работы норий для задачи управления их загрузкой в составе поточно-транспортной системы

Нория (ковшовый конвейер) – устройство, предназначенное для подъема сыпучих материалов (СМ) в вертикальном направлении. Нории являются обязательным и важнейшим видом транспортного оборудования предприятий по перевалке, хранению и переработке СМ, в частности – зерна. Практика показывает, что нории, входя в состав поточно-транспортных линий (ПТЛ) этих предприятий, становятся их «узким местом» по производительности, во многом определяя время выполнения транспортной операции и существенно влияя на ее удельные энергозатраты.

Нарушения, связанные с режимами работы, вызываются перегрузками норий транспортируемым СМ, в частности зерном, или снижением, по различным причинам, транспортирующей способности их грузонесущих органов (ленты с ковшами). Они сводятся к двум основным видам: а) перегрузке по массе транспортируемого СМ; б) перегрузке по объему транспортируемого СМ. Кратко рассмотрим их последствия.

При перегрузке по массе одновременно (синхронно) происходит перегрузка ПЭД нории по величине потребляемого им из питающей сети тока, и, как следствие, постепенный перегрев ПЭД вплоть до предельно допустимого значения. Предотвращая перерастание этой аварийной ситуации (обозначим ее как событие S1) в аварию, суть которой – выход ПЭД из строя из-за потери изоляции его обмоток своих свойств, реле тепловой защиты (РТЗ) отключает ПЭД от сети в аварийном режиме. Одновременно, система автоматического (логического) управления оборудованием всей ПТЛ, предотвращая (блокируя), после S1, формирование многотонных завалов сыпучего материала в точке его перегрузки с транспортера в башмак нории, отключает в аварийном режиме все конвейеры, предшествующие нории. Необходимо отметить, что перегрузки норий СМ по массе и аварийные отключения ПЭД (события S1) могут происходить, как правило, тогда, когда ПЭД норий выбраны исходя из условий максимально экономичной их эксплуатации, т.е. без существенных запасов по мощности. Отметим, что вероятность S1 существенно повышается при снижении напряжения в сети питания ПЭД ниже его номинального значения.

При перегрузке по объему, которая может возникнуть даже при существенной недогрузке нории по массе СМ, коэффициент заполнения ковшей нории принимает, для текущих условий работы нории, максимально достижимое (критическое) значение. Этому значению соответствует максимально достижимое (критическое) значение объемной производительности нории. При перегрузке по объему объемная производительность конвейеров, подающих СМ в норию, становится выше критического значения объемной производительности нории. Это приводит к непрерывному повышению количества и уровня (квазиуровня) СМ сначала в башмаке нории, а, далее, и восходящей ветви норийной трубы. Для предотвращения развития этой аварийной ситуации в аварию, суть которой – заклинивание норийной ленты в трубе сыпучим материалом, в башмаке нории устанавливают датчик-реле подпора (ДП), который, через некоторую выдержку времени после его срабатывания, отключает ПЭД нории и подающих конвейеров от сети в аварийном режиме. Обозначим это событие как событие S2. Подчеркнем, что значение уровня подпора СМ в башмаке нории примерно соответствует критическому коэффициенту заполнения ковшей нории СМ.

При достижении уровнем СМ в норийной трубе критического значения начинается заклинивание норийной ленты этим зерном. Это сопровождается резким возрастанием нагрузки на электродвигатель, провоцированием пробуксовки ленты относительно приводного барабана, ее перегревом, возрастанием рисков ее возгорания и/или обрыва, падения в норийные трубы и первичного пылевоздушного взрыва. Очевидно, что нарушения, вызванные перегрузкой нории по объему транспортируемого СМ, являются потенциально наиболее опасными, т.е. имеют более тяжелые последствия. Это, в частности, связано с тем, что завалы норий возникают чаще для СМ с низкой объемной массой и большим пылевыведением.

Замечание. Понятие «уровень» сыпучего материала (зерна) в башмаке нории достаточно условно, поскольку большая его часть находится в постоянном и разнообразном движении. Именно поэтому предлагается, в качестве целесообразной альтернативы, использовать понятие «квазиуровень». Так, перемещение сыпучего материала ковшами приводит к тому, что количество этого материала и его «уровень» в той части башмака, которая соответствует восходящей ветви норийной ленты, будет значительно выше, чем в противоположной части. Важно, что у стенок башмака нории интенсивность движения СМ мала. Именно у стенок башмака, соответствующих восходящей ветви норийной ленты, устанавливаются датчики подпора СМ. Поэтому здесь и далее понятие «уровень» сыпучего материала в башмаке нории будем понимать как его уровень в вертикальном сечении башмака нории, проходящем через датчик подпора, у стенки, где он установлен.

2. Задача эффективного управления процессом транспортировки зерна ПТЛ с норией и проблемы ее решения

Рассмотренные выше принципиально важные особенности работы норий позволяют сформулировать задачу оптимального управления процессом перегрузки СМ ПТЛ, в состав которой входит нория, следующим образом: необходимо обеспечить такую загрузку (производительность) нории и всей ПТЛ транспортировки СМ, при которой обеспечивается максимальная энергетическая эффективность процесса транспортировки и гарантируется отсутствие возникновения аварийных ситуаций, связанных с перегрузкой нории как по объему, так и по массе транспортируемого СМ.

Основная сложность решения сформулированной задачи определяется особенностями нории и предшествующих ей транспортеров как объекта управления (ОУ):

а) значения критических производительностей различных сыпучих материалов, и, как следствие, критической степени заполнения ковшей, при которой начинается процесс завала нории, априори неизвестны. Они зависят от большого количества факторов: механических характеристик транспортируемого СМ, в частности его фракционного состава и коэффициента внутреннего трения, технического состояния нории, в частности, степени проскальзывания ленты относительно приводного барабана, количества частично или полностью оборванных ковшей, изменения степени натяжения норийной ленты и степени ее перекоса. Последние характеристики влияют на амплитуду и частоту пространственных колебаний грузонесущего органа нории и, следовательно, на фактическую степень заполнения ковшей сыпучим материалом при его транспортировании.

б) при регулировании подачи (расхода) СМ на норию изменением степени открытия подсилосной задвижки время запаздывания в канале регулирования будет во много раз превосходить инерционность ОУ;

в) свойства нории как ОУ по каналу «расход СМ на входе в норию – расход СМ на выходе из нории» изменяются от статических («с самовыравниванием»), когда коэффициент заполнения ковшей ниже критического, до астатических («без самовыравнивания»), когда коэффициент заполнения ковшей становится критическим, и начинается процесс завала нории зерном.

Необходимо подчеркнуть, что режим работы нории на границе критического заполнения ковшей является энергетически наиболее выгодным режимом, т.к. при этом обеспечивается максимально возможная производительность нории и всей ПТЛ. Важно, что задачу максимизации экономической эффективности работы транспортной линии при гарантировании предотвращения перегрузки и завала нории нельзя свести к задаче стабилизации тока или мощности ее ПЭД на предельно допустимом уровне, так как однозначная связь между критической степенью заполнения ковшей и потребляемой мощностью ПЭД нории отсутствует. Все это делает задачу управления процессом транспортировки СМ ПТЛ нетривиальной и требует для разработки специальных проблемно ориентированных и эффективных алгоритмов управления.

Разработка таких алгоритмов, в свою очередь, требует разработки математической модели транспортировки СМ всей ПТЛ. Последняя, в конечном итоге, должна быть реализована в форме имитационной модели. Она позволит проводить компьютерные эксперименты, адекватные реальным условиям работы ПТЛ, в ходе которых появляется возможность исследовать работоспособность и сравнивать эффективность альтернативных алгоритмов для САУ. Очевидно, что наиболее сложной составляющей модели ПТЛ как ОУ, будет являться модель нории.

3. Анализ существующего математического описания процессов транспортирования сыпучих материалов нориями

Математическое описание процессов в нориях, имеющееся в литературных источниках, см. [1 – 4], ориентировано, в основном, на решение задач их конструирования. При этом все рекомендуемые расчеты производятся, как правило, для номинального режима работы норий. В этих расчетах значения таких важнейших переменных, как коэффициент заполнения ковша (ψ), коэффициент сопротивления при зачерпывании СМ ($C_{зч}$) и т.п. принимаются фиксированными, соответствующими номинальному режиму работы нории. Изменения уровня или количества СМ в башмаке нории и процессы, которые вызываются этими изменениями, по крайней мере, в явной форме, в [1 – 4] не рассматриваются. Поэтому, для математического описания процессов транспортирования сыпучих материалов нориями, как ОУ, имеющееся описание должно быть существенно доработано.

Отметим, что из приведенных источников наиболее подробно процессы, происходящие в нории, описаны в [1].

4. Структура математической модели нории как ОУ

Структура модели, см. рис. 1, отражает декомпозицию и взаимосвязь процессов, протекающих в нории. Она включает модели самой нории и ее приводной станции (привода).

Модель нории включает:

- модель процесса заполнения ковшей материалом в башмаке нории;
- модель процесса транспортирования материала на вертикальном участке нории;
- модель процесса разгрузки материала в головке нории;
- модель формирования нагрузки на рабочий орган нории.

Модель приводной станции включает:

- модель функционирования ПЭД, точнее модель его основных рабочих характеристик;
- модель функционирования реле тепловой защиты ПЭД;
- модель передачи момента вращения от ПЭД к приводному барабану нории через редуктор.

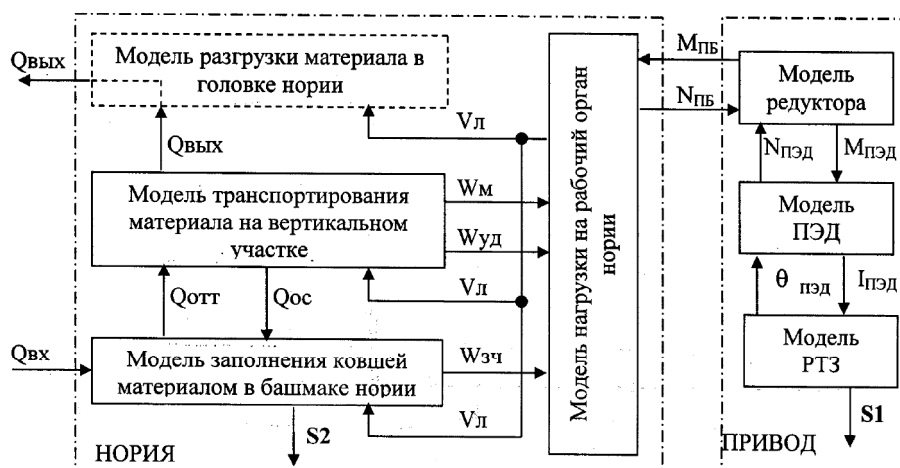


Рис. 1 – Структурная схема модели нории и ее приводной станции

Отметим, что строгое математическое описание указанных процессов, в особенности движения сыпучего материала и изменений его поверхности в башмаке нории, весьма сложно. Вместе с тем, для рассматриваемой нами задачи достаточно приближенного описания. Это объясняется тем, что все неточности (упрощения) описания можно отнести к неконтролируемым возмущениям, последствия которых на практике компенсируются управляющими воздействиями САУ, формируемыми в цепях их обратных связей.

В рамках данной статьи рассмотрим только моделирование процесса заполнения ковшей сыпучим материалом в башмаке нории.

5. Поток сыпучего материала в нории и модель формирования в ее башмаке уровня СМ

Подача СМ в норию может осуществляться «по ходу» и «против хода» движения ковшей. В первом случае заполнение ковшей выполняется «зачерпыванием», во втором – и «засыпанием» и «зачерпыванием». Вне зависимости от способа подачи в башмаке нории быстро формируется определенный уровень $h_{СМ}$ СМ, который и становится определяющим фактором коэффициента (степени) ψ заполнения ковшей к моменту окончания этого заполнения. Этот уровень будет определяться и изменяться с изменением баланса объемных производительностей потоков СМ: $Q_{вх}$ – на входе в норию; $Q_{отт}$ – забираемого из баш-

мака ковшами; Q_{OC} – возвращающегося в башмак из-за осыпания из ковшей при их подъеме к головке норрии. Алгебраическая сумма производительностей потоков определит ту производительность Q_B результирующего потока СМ, который идет на изменение уровня h_{CM} .

Отметим следующее: а) в установившихся режимах работы $Q_B = 0$, тогда $h_{CM} = const$, т.е. уровень СМ в башмаке норрии остается неизменным; б) при загрузке СМ «против хода» его поступление в башмак через загрузочный носок падает до нуля (начинается завал на подающем конвейере), если h_{CM} равен или больше высоте h_{HC} загрузочного носка:

$$Q_{BX} = \begin{cases} Q_{BX}, & h_{CM} \leq h_{HC}; \\ 0, & h_{CM} > h_{HC} \end{cases} \quad (1)$$

в) при $h_{CM} \geq h_{HC}$ и $Q_{OC} > 0$ приращение уровня происходит в восходящей норрийной трубе; г) при загрузке СМ «по ходу» его поступление в башмак через загрузочный носок ограничивается максимальной производительностью перемещения материала норрией:

$$Q_{BX} = \begin{cases} Q_{BX}, & Q_{BX} < Q_{ПБ}^{МАКС} \\ Q_{ПБ}^{МАКС}, & Q_{BX} \geq Q_{ПБ}^{МАКС} \end{cases} \quad (2)$$

Скорость изменения h_{CM} даже при $Q_B = const$, не будет одинаковой. Это обуславливается тем, что площадь $S_{h_{CM}}$ пространства, которое может быть заполнено СМ в башмаке норрии, изменяется по высоте в силу ее конструктивных особенностей, т.е. $S_{h_{CM}} = f(h_{CM})$. Учитывая сказанное, математическая модель изменения уровня СМ в башмаке норрии имеет вид:

$$h_{CM}(t) = \frac{1}{S_{h_{CM}}(h_{CM})} \int_0^t (Q_{BX}(t) - Q_{ОТТ}(t) + Q_{OC}(t)) dt \quad (3)$$

Структурная схема модели (3) представлена на рис.2.

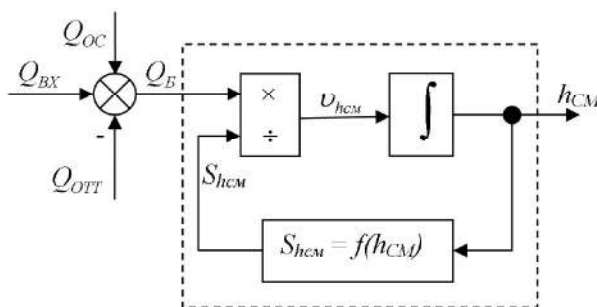


Рис. 2 – Структурная схема расчета текущего значения уровня СМ в башмаке норрии

Отметим, что текущее значение и изменение $S_{h_{CM}}$, т.е. характер функции $S_{h_{CM}} = f(h_{CM})$, существенно влияют на динамические свойства норрии как ОУ по каналу « $Q_{BX} - h_{CM}$ », в частности на скорость развития аварийной ситуации, связанной с превышением ограничения объемной производительности норрии. Именно поэтому их важно адекватно отразить в математической модели норрии.

6. Моделирование изменения площади башмака норрии, заполняемого сыпучим материалом

Площадь $S_{h_{CM}} = f(h_{CM})$ зависит от конструкции башмака норрии и положения в нем натяжного барабана. Конструкция башмака зависит от типа норрии и при управлении производительностью норрии остается неизменной. Положение натяжного барабана изменяется при натягивании ленты и при управлении производительностью норрии является возмущением.

Изменение площади сечения башмака удобно задать с применением нормирования переменных относительно их известных или достаточно просто измеряемых значений:

$$S_{h_{CM}} / S_{нт} = f(h_{CM} / h_{\sigma}), \quad (4)$$

где h_B и S_{HT} высота башмака норрии и площадь сечения норрийных труб соответственно.

Изменение половины площади сечения башмака без барабана ($S'_{h_{CM}}$) в нормированных значениях для норрии типа У13-УН100 приведено в табл. 1 и иллюстрируется рис. 3.

Таблица 1 – Изменение половины площади сечения башмака без барабана ($S'_{h_{CM}}$) в нормированных значениях для норрии типа У13-УН100

h_{CM}/h_B	0	0,19	0,6	0,91	0,91	1,0	1,1
$S'_{h_{CM}}/S_{нт}$	0,88	2,39	2,39	3,67	2,39	1,0	1,0

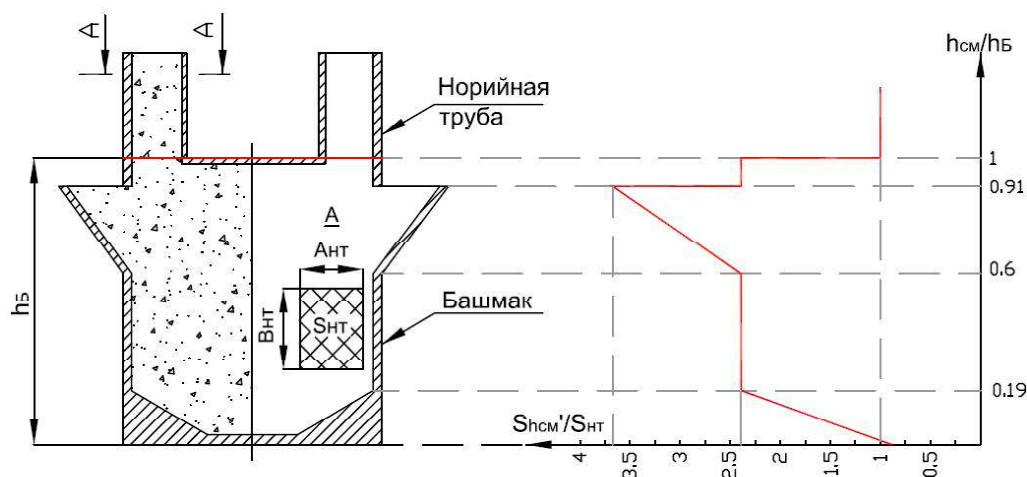


Рис. 3 – Изменение половины нормированного значения площади сечения башмака (без натяжного барабана) в функции нормированного значения уровня СМ

Выражение (4) можно переписать в следующем виде:

$$S_{h_{CM}} = (S'_{h_{CM}} / S_{HT} - S_{NB} / S_{HT}) S_{HT}, \quad (5)$$

где S_{NB} – площадь, занимаемая в башмаке нории натяжным барабаном, которая может быть вычислена из выражения (4):

$$S_{NB} = \begin{cases} 0, & h_{CM} \leq (h_{NB} - R_{NB}) \\ \sqrt{R_{NB}^2 - (h_{NB} - h_{CM})^2} \cdot V_{HT}, & (h_{NB} - R_{NB}) < h_{CM} < h_{NB} \\ R_{NB} \cdot V_{HT}, & h_{CM} \geq h_{NB} \end{cases} \quad (6)$$

где h_{NB} и R_{NB} – высота оси и радиус натяжного барабана; V_{HT} – размер норийной трубы, параллельный ленте. Иллюстрация изменения площади сечения $S_{h_{CM}}$ с учетом натяжного барабана приведена на рис. 4.

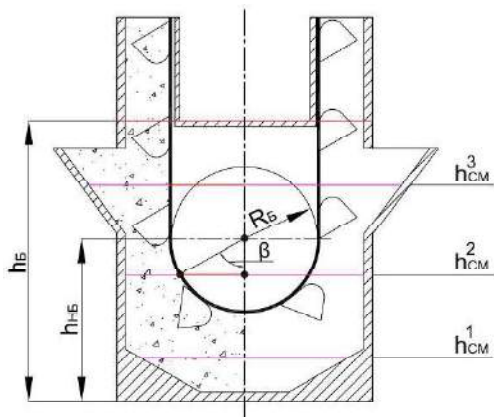


Рис. 4 – Иллюстрация изменения площади сечения с учетом натяжного барабана

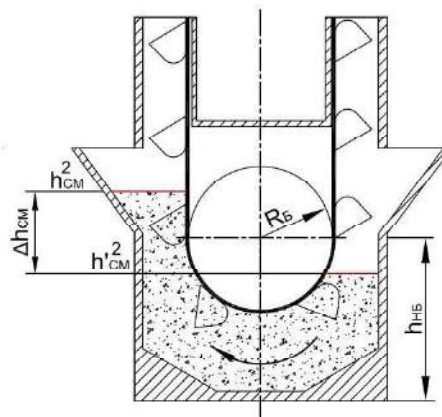


Рис. 5 – Иллюстрация изменения уровня СМ при его перемещении в башмаке нории

7. Особенности формирования уровня сыпучего материала в башмаке нории при его перемещении в нем и отражение их в модели

При достижении и превышении сыпучим материалом уровня его зачерпывания ковшами, он начинает перемещаться ими в ту часть башмака, которая переходит в норийную трубу восходящего движения ленты. Максимальная производительность $Q_{ПБ}^{МАКС}$ этого перемещения СМ может существенно превышать максимальную производительность самой нории, т.к. в нижней части башмака оно осуществляется сплошным потоком. Значение $Q_{ПБ}^{МАКС}$ можно определить из выражения:

$$Q_{ПБ}^{МАКС} = (L_K V_K) v_{PO}, \quad (7)$$

где v_{PO} – скорость рабочего органа нории (ленты), м/с; L_K и B_K – вылет и ширина ковша, м.

Важно, что при рассматриваемом перемещении СМ его поверхность в башмаке становится несимметричной, см. рис 5.

Точное описание изменения поверхности СМ в башмаке нории затруднено, т.к. требует учета многих специфических характеристик СМ. Поскольку, как уже отмечалось выше, в высокой точности описания необходимости нет, то для упрощения примем, что при достижении уровнем h_{CM} СМ натяжного барабана дальнейшее изменение уровня будет продолжаться в восходящей (левой на рисунке) части башмака, а уровень в правой части будет оставаться на уровне натяжного барабана. Так как в выражении (5) значение $S_{h_{CM}} = f(h_{CM})$ является половиной площади башмака, то поэтому, пока уровень h_{CM} не достиг натяжного барабана, принимается, что он изменяется в обоих «частях» башмака синхронно. В этом случае рассчитанную по (5) и (6) площадь $S_{h_{CM}}$ необходимо умножить на коэффициент площади $k_S = 2$. При дальнейшем повышении уровня h_{CM} для расчета $S_{h_{CM}}$ значение $k_S = 1$, т.е.:

$$k_S = \begin{cases} 2, & h_{CM} \leq h_{НБ} \\ 1, & h_{CM} > h_{НБ} \end{cases} \quad (8)$$

Следует отметить, что поскольку между пусками нории «зачистка» ее башмака не проводится, то начальное значение уровня $h_{CM} = h_0$:

$$h_0 = h_{НБ} - R_{НБ} - L_K \quad (9)$$

8. Моделирование процесса заполнения ковшей нории сыпучим материалом

Характер этого процесса существенно зависит от способа подачи СМ в норию. Рассмотрим их варианты последовательно.

Загрузка нории «по ходу». При этом процесс заполнения ковшей сводится к процессу зачерпывания ими СМ. Он достаточно сложен и зависит от уровня h_{CM} , формы поверхности СМ в башмаке нории, формы ее ковшей, скорости их движения, сил, действующих на частицы материала в процессе заполнения, физико-механических свойств транспортируемого СМ и др. Начало процесса, [1], соответствует моменту «внедрения» ковша в СМ.

Для упрощения получения зависимости $\psi = \psi_{3ч} = f(h_{CM})$ выделим в башмаке по его высоте четыре зоны (см. рис. 6), в которых факторы, существенно влияющие на коэффициент $\psi = \psi_{3ч(i)}$ заполнения ковша в зоне i , меняются.

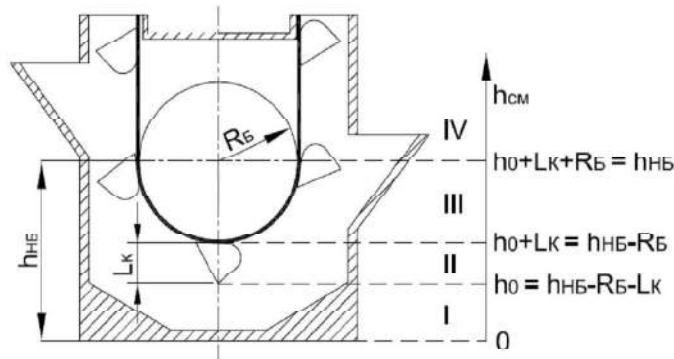


Рис. 6. – Схема выделения уровней СМ в башмаке нории (загрузка «по ходу») для описания процесса зачерпывания

Зона I. $h_{CM} \in [0, h_0] = [0, h_{НБ} - R_{НБ} - L_K]$. Для этой зоны, что очевидно, $\psi_{3ч(i)} = 0$. Отметим, что значения $R_{НБ}$ и L_K для конкретной нории являются константами, а значение $h_{НБ}$ может изменяться. Характер этого изменения определяется типом натяжного устройства. Так для винтового натяжного устройства, по [5], ход натяжки, т.е. $\Delta h_{НБ} \approx (0,03 \dots 0,05)H$. Это означает, что границы этой и остальных зон не являются фиксированными, а изменяются во времени. При управлении загрузкой нории такие изменения будут являться возмущениями.

Зона II. $h_{CM} \in [h_0, h_0 + L_K] = [h_{НБ} - R_{НБ} - L_K, h_{НБ} - R_{НБ}]$. При движении ковша внутри зоны $\psi_{3ч(II)}$ зависит, в основном, от h_{CM} и от его формы (типа ковша), а при выходе из зоны – от равнодействующей центробежной и гравитационной сил, приложенной к частицам СМ. Эта равнодействующая может во многом определять конечное значение $\psi_{3ч(II)}$:

$$\psi_{3ч(II)} = \begin{cases} \psi'_{3ч(II)}, & \psi'_{3ч(II)} \leq \psi_{3ч}^{GP} \\ \psi_{3ч}^{GP}, & \psi'_{3ч(II)} > \psi_{3ч}^{GP} \end{cases} \quad (10)$$

где переменная $\psi'_{3ч(II)}$ тождественна $\psi_{3ч(II)}$, но не учитывает ограничения $\psi_{3ч}^{ГР}$.

Характер изменения $\psi'_{3ч(II)}$ в функции h_{CM} может быть приближенно получен по габаритным размерам (сечению) ковша, как отношение площади, отсеченной линией погружения ковша до его крайней кромки, к общей площади сечения ковша. Пример изменения $\psi'_{3ч(II)}$ для глубокого ковша, перемещающего в т.ч. зернистые грузы, приведен в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2 – Изменение коэффициента $\psi'_{3ч(II)}$ заполнения ковша в зоне II при изменении уровня материала в башмаке норин

$(h - h_0)/L_K$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.00
$\psi'_{3ч(II)}$	0	0.012	0.05	0.11	0.2	0.31	0.44	0.58	0.72	0.87	1

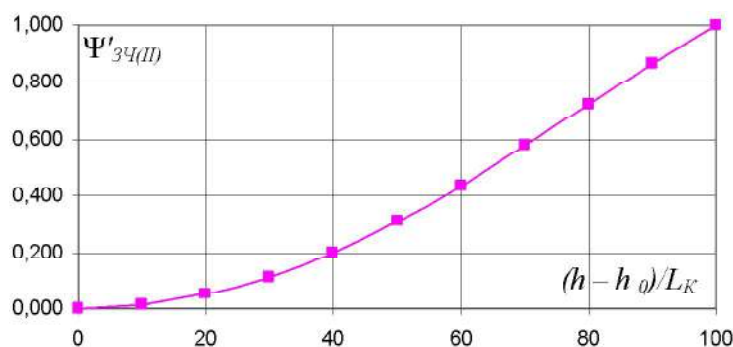


Рис. 7 – Изменение коэффициента заполнения ковша при зачерпывании СМ в функции относительного изменения уровня СМ в зоне II башмака норин

Для расчета значения $\psi_{3ч}^{ГР}$ рассмотрим равнодействующую силу в момент выхода ковша из слоя СМ, взяв за основу процедуру, предложенную в [1]. Вместе с тем, результатов, полученных в [1] недостаточно, чтобы можно было вести непрерывный перерасчет значения $\psi_{3ч}^{ГР}$ в функции h_{CM} , необходимого для моделирования процесса зачерпывания в динамике. Отметим, что процедура расчета значения $\psi_{3ч}^{ГР}$, которая будет рассмотрена ниже, одинакова и для второй и третьей зон, т.е. когда ковш движется по окружности и, следовательно, на СМ действует центробежная сила. Рассмотрим ситуацию, когда высота передней кромки открытой части ковша (в сечении – точка М) равна уровню h_{CM} , см. рис. 8а.

Вектор \bar{T} равнодействующей центробежной силы \bar{C} и силы тяжести \bar{G} определяется как геометрическая сумма соответствующих векторов:

$$\bar{T} = \bar{C} + \bar{G}. \quad (11)$$

Положение равнодействующей \bar{T} совпадает с радиусом окружности вращения точки М, т.е. с прямой, проведенной из центра вращения – полюса Р, через точку М. Эта же прямая определяет верхнюю границу заполнения ковша СМ – отрезок МА. При этом положение полюса Р можно определить через полюсное расстояние h_P в соответствии с [1]:

$$h_P = (OM) \frac{CT}{MC} = (R_{НБ} + L_K) \frac{mg}{m\omega_{НБ}^2 (R_B + L_K)} = \frac{g}{\omega_{НБ}^2} \approx \frac{895}{n_{НБ}^2}, \quad (12)$$

где m – масса материала в ковше, кг; ω_{IA} – угловая скорость натяжного барабана, рад/с; $n_{НБ}$ – обороты натяжного барабана, об./мин.

Минимальное значение степени заполнения ковша СМ, т.е. $\psi_{3ч}^{ГР} = \psi_{3ч}^{ГР(МИН)}$, соответствует ситуации, когда полюс Р будет совмещен с центром оси натяжного барабана ($h_P = 0$). В этом случае расположение СМ в ковше сверху будет ограничиваться отрезком МВ, см. рис. 8а и 8б.

Для глубокого (Г) ковша (тип – III) минимальное граничное значение коэффициента степени заполнения ковша приближенно составляет $\psi_{3ч}^{ГР} = \psi_{3ч}^{ГР(МИН)} \approx 0,66$. Представим $\psi_{3ч}^{ГР}$, состоящей из двух составляющих: минимальной и добавочной:

$$\psi_{3ч}^{ГР} = \psi_{3ч}^{ГР(МИН)} + \psi_{3ч}^{ГР(ДОБ)} = 0,66 + \psi_{3ч}^{ГР(ДОБ)}. \quad (13)$$

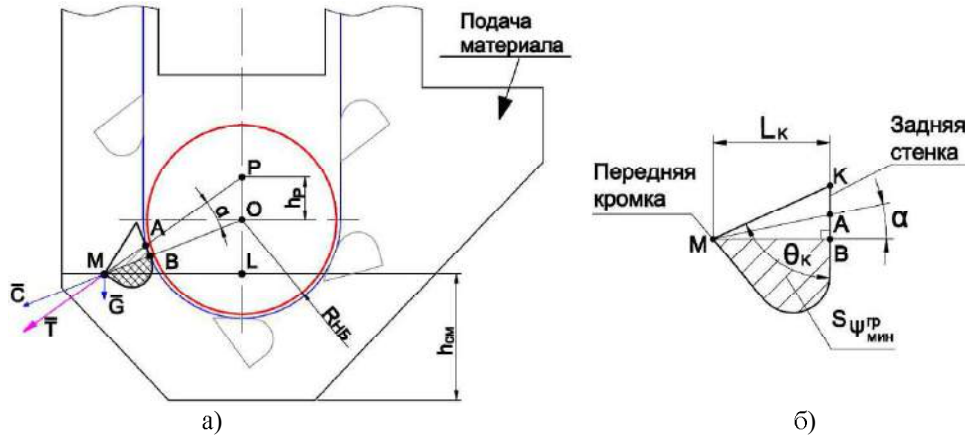


Рис. 8 – К определению граничного значения заполнения ковша $\psi_{3ч}^{GP}$ при наличии центробежной силы, действующей на СМ

Эта добавочная составляющая может быть определена как отношение площади «добавочного» треугольника МАВ к общей площади сечения ковша, см. рис. 8б:

$$\psi_{3ч}^{GP(ДОБ)} = (1 - \psi_{3ч}^{GP(МИН)}) \frac{S_{МАВ}}{S_{МКВ}} = (1 - 0,66) \frac{S_{МАВ}}{S_{МКВ}}, \quad (14)$$

или, что аналогично:

$$\psi_{3ч}^{GP(ДОБ)} = (1 - \psi_{3ч}^{GP(МИН)}) \frac{\angle АМВ}{\angle КМВ} = (1 - 0,66) \frac{\angle АМВ}{\angle КМВ}. \quad (15)$$

После достаточно очевидных преобразований, см. рис. 8, получим:

$$\psi_{3ч}^{GP(ДОБ)} = (1 - 0,66) \frac{\arctg \left(\frac{h_P + (h_{HB} - h_{CM})}{(R_{HB} + L_K) \cos \left(\arcsin \left(\frac{h_{HB} - h_{CM}}{R_{HB} + L_K} \right) \right)} \right) - \arcsin \left(\frac{OL}{R_{HB} + L_K} \right)}{90^\circ - \Theta}. \quad (16)$$

Зона III. $h_{CM} \in [h_0 + L_K, h_0 + L_K + R_{HB}] = [h_{HB} - R_{HB}, h_{HB}]$. В этой зоне, по-сути, ковши нории начинают вертикальное транспортирование СМ. Коэффициент заполнения ковшей, без учета его ограничения, вызванного действием равнодействующей центробежной и гравитационной сил, приложенной к частицам СМ, будем вычислять из выражения:

$$\psi'_{3ч(III)} = \frac{(h_{CM} - h_0 - L_K)(\psi_{3ч(IV)} - \psi_{3ч(III)})}{R_{HB}} + \psi_{3ч(III)}, \quad (18)$$

а с учетом действия этой силы:

$$\psi_{3ч(III)} = \begin{cases} \psi'_{3ч(III)}, & \psi'_{3ч(III)} \leq \psi_{3ч}^{GP} \\ \psi_{3ч}^{GP}, & \psi'_{3ч(III)} > \psi_{3ч}^{GP} \end{cases}, \quad (19)$$

где $\psi_{3ч}^{GP}$ рассчитывается, как и для зоны II, по выражениям (13 – 16).

Зона IV. $h_{CM} \in [h_0 + L_K + R_{HB}, \infty] = [h_{HB}, \infty]$. В этой зоне ковш движется вертикально и центробежная сила на СМ не действует. В этой зоне ковш заполняется до максимально возможной величины, которая, что важно, не зависит от уровня h_{CM} . Коэффициент его заполнения ковша на выходе из зоны $\psi'_{3ч(IV)}$ будет близок к единице, в т.ч. может быть и больше единицы. Его конкретное значение будет определяться типом (формой) ковша и углом естественного откоса СМ. Так, для глубоких ковшей (тип III) угол зачерпывания $\Theta_K = 65^\circ$, см. рис. 9. Тогда ковш будет заполнен на 100 %, т.е. его $\psi = 1$, если угол естественного откоса γ СМ будет равен $\gamma = 90^\circ - \Theta_K = 90 - 65^\circ = 25^\circ$. Отметим, что большинство СМ, транспортируемых нориями, в частности зерновые, имеют угол естественного откоса больше 25° .

Например, для пшеницы он достигает 32° , а для семян подсолнечника – 45° . Кроме того (см. рис. 9),

т.к. ковш закреплен на ленте нории, то и сама лента при $\psi \geq 1$ выступает дополнительной опорой для СМ.



Рис. 9 – Вариант заполнения ковша с $\psi \geq 1$ при его выходе из слоя СМ на вертикальном участке подъема

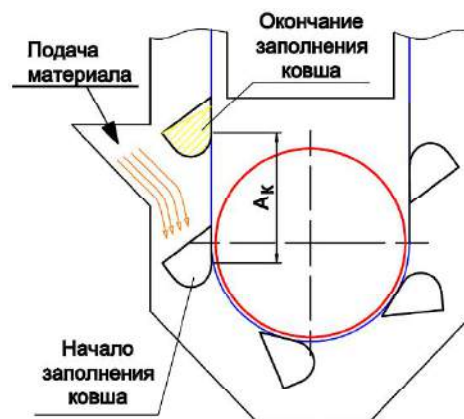


Рис. 10 – Заполнение ковша при подаче СМ «против хода»

Примем два следующих допущения, связанных с моделированием процесса. Первое. Угол γ для СМ, находящегося в движении, всегда меньше, чем γ для этого же покоящегося СМ, который и приводится в справочных таблицах ($\gamma^{сп}$). Для моделирования примем, $\gamma = 0,8\gamma^{сп}$. Второе. При $\psi \geq 1$ осыпание СМ из ковша из-за превышения угла естественного откоса происходит, в том числе, и через его боковые стенки. Но для упрощения модели процесса заполнения ковша и, в силу того, что ψ превышает единицу очень незначительно, такое осыпание в модели отражать не будем. Тогда, с учетом принятых допущений, значение ψ :

$$\psi_{3ч(IV)} = \psi_{3ч}^{ГР(МИН)} + \left(1 - \psi_{3ч}^{ГР(МИН)}\right) \frac{0,8\gamma}{90^\circ - \Theta_K}. \quad (20)$$

Загрузка нории «против хода». При этом процесс заполнения ковшей будем рассматривать как процесс засыпания в них СМ, который подается в норию через питающий носок ее башмака. При этом коэффициент заполнения каждого ковша ψ будет зависеть от двух факторов: производительности потока СМ на входе в норию в момент заполнения ковша и от времени его заполнения. Отметим следующее. Первый фактор определяется внешними, по отношению к нории, условиями, и он существенно меняется во времени. Второй фактор определяется только конструктивными особенностями конкретной нории, в частности скоростью ее ленты, шагом установки и высотой ковшей, высотой питающего носка и т.п.

При моделировании будем считать, что процесс заполнения ковшей осуществляется последовательно, при этом окончание процесса заполнения ковша наступает в момент, когда он поднимается на уровень загрузочного носка, и, в этот момент, начинается заполнение следующего ковша, см. рис. 10. Тогда время заполнения (засыпания) ковша соответствует времени перемещения ковша на расстояние, равное шагу ковшей A_K :

$$t_{3ч} = A_K / v_{Л}, \quad (21)$$

где $v_{Л}$ – скорость ленты конвейера.

Поскольку засыпание СМ в ковш происходит при его движении по вертикальному участку, то граничное значение заполнения ковша $\psi_{зан}^{2р}$ при моделировании примем равным $\psi_{3ч(IV)}$, см. (20), т.е.:

$$\psi_{зан}^{2р} = \psi_{3ч(IV)}. \quad (22)$$

В том случае, когда $\psi_{зан} \leq \psi_{зан}^{2р}$, будем считать, что весь входной поток СМ производительностью $Q_{ВХ}$ размещается в ковшах без его осыпания в башмак. При этом объем заполнения ковшей $V_{СМ}^{3АП}$ будет вычисляться по выражению:

$$V_{СМ}^{3АП} = Q_{О}^{ВХ} t_{3ч}, \quad (23)$$

В ситуации, когда весь входной поток СМ производительностью $Q_{ВХ}$ не может разместиться в ковшах, то его избыток осыпается в башмак нории, тем самым повышая в нем уровень $h_{СМ}$. Когда этот уровень превысит нижнюю границу зоны II, начнется процесс зачерпывания ковшем СМ. Т.к. он предшествует процессу засыпания в него СМ, то последующее засыпание СМ происходит уже в частично заполненный ковш, а это уменьшает количество СМ, засыпающегося в ковш, что, в свою очередь, на эту вели-

чину, збільшує осипання СМ в башмак. С урахуванням сказаного, без урахування обмеження на коефіцієнт заповнення ковша:

$$\Psi'_{ЗАП} = \Psi_{ЗЧ} + \Psi_{ЗС} = \Psi_{ЗЧ} + \frac{V_{СМ}^{ЗАП}}{i_K \cdot 10^{-3}}, \quad (24)$$

де i_K – ємкість (об'єм) ковша. С урахуванням обмежень по (27):

$$\Psi_{ЗАП} = \begin{cases} \Psi'_{ЗАП}, & \Psi'_{ЗАП} \leq \Psi_{ЗАП}^{ГР} \\ \Psi_{ЗАП}^{ГР}, & \Psi'_{ЗАП} > \Psi_{ЗАП}^{ГР} \end{cases} \quad (25)$$

При $\Psi_{зан} \geq \Psi_{зан}^{сп}$ об'єм СМ, осипаючогося з одного ковша:

$$V_{ОС}^{ЗАП} = (\Psi'_{ЗАП} - \Psi_{ЗАП}^{ГР}) \cdot i_K \cdot 10^{-3}, \quad (26)$$

а продуктивність потоку осипання СМ в башмак:

$$Q_{ОС}^{ЗАП} = \frac{V_L}{A_K} (\Psi'_{ЗАП} - \Psi_{ЗАП}^{ГР}) \cdot i_K \cdot 10^{-3}. \quad (27)$$

9. Реализация и применение математической модели норри

Представленная выше математическая модель процесса заполнения ковшей норри сыпучим материалом была реализована в форме ее имитационной модели в среде Simulink. Некоторые результаты такого моделирования для норри типа У13-УН100 при транспортировании зерна пшеницы приведены на рис. 11.

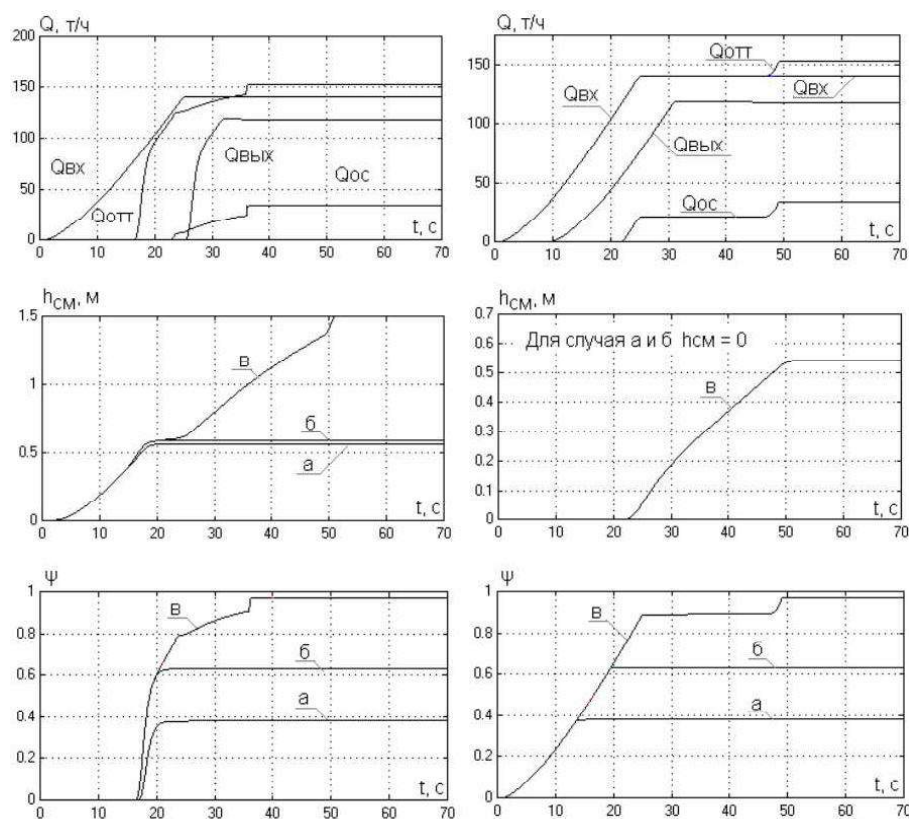


Рис. 11 – Результати імітаційного моделювання процесу заповнення ковшеї норри: справа – подача СМ «по ходу», слева – подача СМ «проти ходу»; графіки змінних Q для Q_{BX} (в установившемся режимі) 140 т/ч, графіки змінних $h_{СМ}$ і Ψ для Q_{BX} – а) 60 т/ч; б) 100 т/ч; в) 140 т/ч

Реалізувавши повну імітаційну модель норри і інтегрувавши її з моделлю управляючого пристрою, можливо проводити комп'ютерні імітаційні експерименти по обробці алгоритмів оптимального управління загрузкою норри, включаючи передварійні та аварійні режими її роботи.

Литература

1. Подъемно-транспортные и погрузочно-разгрузочные устройства // Платонов П.Н., Куценко К.И. Изд. 2-е, перераб. и доп. – «Колос», М., 1972.
2. Подъемно-транспортные машины // Фиделев А.С. Изд. объедин. «Вища школа», 1975. – 220 с.
3. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 6-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1985. – 520 с., ил.
4. Машины непрерывного транспорта // Зеленкой Р.Л., Иванков И.И., Колобов Л.Н. Изд. 2-е, перераб. и доп. – «Машиностроение», М., 1987. – 431 с.

УДК 62-50:621.86.08:636.085.6

КОМПЛЕКСЫ ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

Хобин В.А., д-р техн. наук, проф., Дец Д.В., ассистент
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Проведен сравнительный анализ базовых технологических схем комплексов весового дозирования и формирования многокомпонентных смесей сыпучих материалов как систем автоматического управления. С позиций повышения точности соответствия формируемой смеси заданному рецепту и ее однородности рассмотрены наиболее важные взаимосвязанные аспекты и проблемы, относящиеся к метрологии измерения массы, функциям и алгоритмам управления, направлениям их совершенствования, критериям оптимизации.

The comparative analysis of basic technological schemes of weight batching complexes and formation of multicomponent mixes of loose materials as automatic control systems is carried out. The most important interconnected aspects and problems which concern to metrology of measurement weight, to functions and management algorithms, to directions of their perfection, to optimization criteria are considered from positions of increase accuracy conformity of a formed mix to the recipe and its uniformity.

Ключевые слова: смеси компонентов, дозирование, варианты технологий, управление, оптимизация.

Введение. Формирование смесей сыпучих материалов является составной частью технологических процессов многих отраслей промышленности: комбикормовой, пищевой, строительных материалов, химической, металлургической и др. [1–6]. Во всех случаях соответствие полученной смеси ее заданному рецепту в самой значительной степени определяет качество готовой продукции, а производительность процесса – заметно влияет на ее себестоимость.

Практика применения комплексов дозирования показывает, что в большинстве случаев рецепт смеси задается, а дозирование осуществляется по величине массы (альтернатива – по объему) входящих в смесь компонентов. Точность измерения масс компонентов является важным, но не единственным фактором, определяющим точность соответствия сформированной смеси ее заданному рецепту. При этом точность и производительность для комплексов весового дозирования являются, в определенной мере, противоречивыми показателями. На этапе предпроектного анализа, при выборе конкретной технологической схемы реализации комплекса, они выступают как основные факторы, определяющие компромисс, на основе которого и принимается решение. Кроме этих двух факторов обычно учитывают стоимость оборудования, удобство компоновки в производственных объемах, характеристики дозируемых материалов (сыпучесть, пыление, гранулометрический состав и др.).

Рассмотрим здесь три варианта технологических схем многокомпонентного дозирования, имеющих широкое распространение в различных отраслях промышленности, компоновку которых можно считать классической (базовой):

- а) порционное дозирование с одним весоизмерительным бункером, который заполняется компонентами смеси из расходных бункеров со шнековыми разгрузителями;
- б) непрерывное дозирование с ленточными весоизмерительными дозаторами с управляемой скоростью ленты и смесителем непрерывного действия;
- в) непрерывное дозирование с весоизмерительными расходными бункерами, имеющими шнековые разгрузители с управляемой скоростью вращения вала.