

- Васильев (РФ), Н. Ф. Хоменко, Г. М. Олифер (Украина), В. Х. Демтиров, Г. И. Григоров (РФ). – № 4890427/06 ; заявл. 13.12.90 ; опубл. 07.05.93, Бюл. № 17.
7. Декларационный патент № 47751А Украина, МПК⁷ F 25 В 15/10. Комбинированный абсорбционный холодильник / О. С. Титлов, М. Д. Захаров, О. Б. Васильев, С. В. Вольневич (Украина). – № 2001096073 ; заявл. 04.09.2001 ; опубл. 15.07.02, Бюл. № 7.
 8. Дытнерский Ю. И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1986.– 272 с.
 9. Титлов А. С. Перспективы использования эффекта осмоса в холодильной технике / А. С. Титлов, С. В. Вольневич, О. Б. Васильев, В. Н. Халайджи // Холодильная техника и технология. – 2000. – № 69. – С. 24–32.
 10. Теплофизические основы получения искусственного холода. – М. : Пищ. пром-сть, 1980.– 231 с.

УДК 004.942:621.313.3.018.5

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НОРИИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ СВОЙСТВАМИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЛЕНТЫ

Хобин В.А., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
Кириязов И.Н.
Компания С-инжиниринг, г. Одесса

Разработаны модели динамики процессов накопления сыпучего материала на восходящей ветви ленты нории, его осыпания из ковшей в башмак по мере их подъема, возникновения сил сопротивления движению ленты в процессе зачерпывания, транспортирования и осыпания сыпучего материала.

The free-running material accumulation processes dynamics models on an ascending branch of a tape bucket elevator, its shattering from bucket in a boot end in process of their rise, occurrence of resistance forces to tape's movement in scooped process, a free-running material's transportation and shattering are developed.

Ключевые слова: нория, математическая модель динамики, транспортирование сыпучего материала, силы сопротивления движению ленты.

Вступление. Данная статья является продолжением [1]. Вступительные разделы в [1] необходимо рассматривать как общие. Обозначения переменных, принятые в них, сохранены. Подчеркнем, что строгое математическое описание процессов в нории, рассматриваемых и в этой, и в предшествующей статье, в особенности связанных с движением сыпучего материала (СМ), практически невозможно. Вместе с тем, для рассматриваемой нами задачи достаточно приближенного описания, но такого, которое отражает все принципиально важные (качественные) особенности моделируемых процессов. Это объясняется тем, что все количественные неточности (упрощения) описания можно отнести к неконтролируемым возмущениям на объект управления (ОУ), последствия которых на практике компенсируются управляющими воздействиями системы автоматического управления (САУ), формируемыми в цепях их обратных связей. Важно, что именно управление должно обеспечить на практике материальный баланс расходов $Q_{ВХ}$ – на входе в норию; $Q_{ОТ}$ – забираемого из башмака ковшами; $Q_{ОС}$ – возвращающегося в башмак из-за осыпания из ковшей при их подъеме к головке нории. Наличие такого баланса означает стабильность значения уровня $h_{СМ}$ СМ в башмаке нории, а, значит, ее работу без завалов (событие S₂).

1 Основные допущения при моделировании процесса транспортирования СМ

Транспортирование СМ – это его перемещение по вертикальному участку нории. Формально, по определению, высота H вертикального участка перемещения СМ – это расстояние от горизонтальной оси натяжного барабана до горизонтальной оси приводного барабана. В разрабатываемой модели будем считать, что указанный процесс начинается сразу после загрузки ковша. Однако фактическое окончание его загрузки зависит от уровня $h_{СМ}$ в башмаке нории, который, в общем случае, по отношению к высоте $h_{НБ}$ оси натяжного барабана может занимать различное положение. В случае, если $h_{СМ} \geq h_{НБ}$, то высоту подъема будем уменьшать на величину разности этих высот, хотя величина эта незначительная, и ею можно было бы пренебречь:

$$H' = H - (h_{CM} - h_{НБ}). \quad (1)$$

Ковш с СМ, при его движении по этому участку норрии, помимо вертикальной составляющей движения, которую будем считать равномерной и прямолинейной, имеет и другие, более сложные, составляющие движения. Эти составляющие определяются пространственными колебательными движениями ленты норрии как упругого тела с распределенными по высоте силой натяжения и массой. На них также влияют прогиб и колебания ленты, вызываемые моментами вращения, создаваемыми каждым ковшом из-за смещения («вылета») его центра тяжести относительно плоскости ленты. Главное последствие такого движения – высыпание СМ из ковшей по ходу его движения. Математическую модель (ММ) такого движения необходимо было бы рассматривать как модель с распределенными параметрами по высоте ленты, фактически описывая индивидуальное движение каждого ковша и находящегося в нем СМ. Очевидно, что это весьма сложная, причем нестационарная (упругие свойства ленты и ее натяжение меняются во времени) задача, решение которой возможно только очень приближенно.

Учитывая изложенное, было принято решение такую модель не разрабатывать, а заменить ее упрощенной моделью, в которой принять следующее:

— СМ осыпается из ковша в норрийную трубу в ходе его движения, когда фактический коэффициент загрузки ковша по окончании процесса загрузки, в начале вертикального движения, оказался больше его граничного значения, т.е.: $\psi(h = 0) > \psi_{ГР}$;

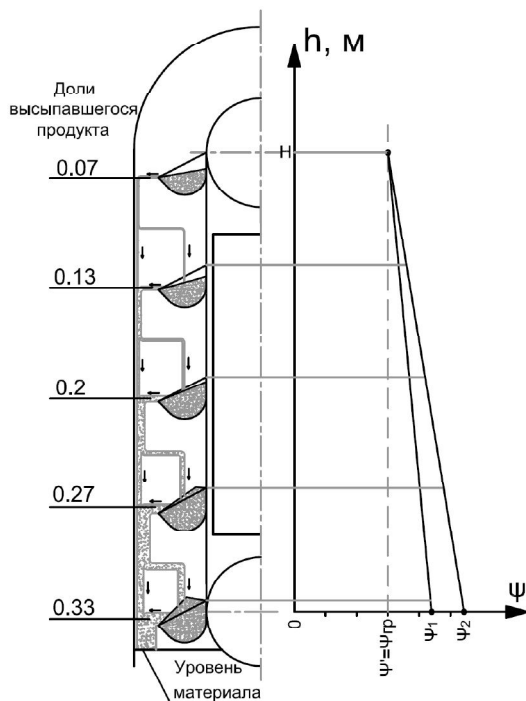
— осыпание прекращается в конце вертикального перемещения ковша, т.е. при его достижении высоты соответствующей оси приводного барабана, по достижению текущего значения коэффициента заполнения ковша $\psi' = \psi(h = H') = \psi_{ГР}$;

— распределение величины осыпавшегося из ковшей СМ по высоте его подъема принимаем равномерным:

$$\psi(h) = \begin{cases} \frac{\psi(h = H) - \psi(h = 0)}{H} h + \psi(h = 0), & \psi(h = 0) > \psi_{\bar{A}D} ; \\ \psi(h = 0), & \psi(h = 0) \leq \psi_{\bar{A}D} \end{cases} \quad (2)$$

— учет нестационарности процесса осыпания при моделировании будем воспроизводить за счет изменений значения $\psi_{ГР}$.

Перемещение СМ на вертикальном участке норрии, с учетом принятых допущений, иллюстрируется рис. 1.



Принятые обозначения: ψ_1 и ψ_2 – варианты значений коэффициента заполнения ковшей $\psi(h = 0) > \psi_{ГР}$

Рис. 1 – Иллюстрация принятой модели осыпания СМ в норрийной трубе

2 Моделирование процессов накопления СМ на участке транспортирования норий и его осыпания из ковшей

Текущее значение массы СМ с объемной (насыпной) плотностью $\rho_{СМ}$, поднимаемого норией, определяется текущим (изменяющимся) значением его объема, находящегося в ковшах, и может быть найдено как значение интеграла от разности производительностей, рассчитываемого на скользящем интервале времени $[t, t + t_{II}]$, равному времени подъема:

$$m_{\dot{N}}^{IE}(t) = V_{\dot{N}}^{IA}(t) \rho_{\dot{N}} = c_{\dot{N}} \int_t^{t+t_I} (Q_{i\dot{O}\dot{O}}(t) - Q_{\dot{N}}(t) - Q_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}}(t)) dt, \quad (3)$$

где Q_{OIT} , Q_{OC} , Q_{BLY} – объемные производительности нории, соответственно: при заборе СМ ковшами из башмака, осыпавшегося СМ при транспортировке, фактическая (на выходе).

Значения Q_{OIT} и Q_{BLY} могут быть рассчитаны, см. [2, С. 85], по значениям $\psi(h=0)$ и $\psi' = \psi(h=H) = \psi_{ГР}$ и известным, указанным в техническом паспорте нории, объему i_K ее ковша, расстоянию A_K между ковшами и скоростью V_L ленты, соответственно:

$$Q_{i\dot{O}\dot{O}} = \frac{i_E}{A_E} \cdot \psi \cdot V_E, \quad Q_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}} = \frac{i_E}{A_E} \cdot \psi_{AD} \cdot V_E. \quad (4)$$

Производительность осыпания Q_{OC} СМ найдем следующим образом. С учетом (2), объем осыпавшегося СМ в функции высоты подъема ковша определяется из выражения:

$$V_{OC}(h) = V_{OC(h=0)}(1 - h/H). \quad (5)$$

Интегрируя (5) по высоте $h \in (0, H)$, найдем полный объем СМ, осыпавшегося за весь подъем:

$$V_{\dot{N}} = \int_0^H V_{\dot{N}(h=0)} \left(1 - \frac{h}{H}\right) dh = V_{\dot{N}(h=0)} \left[\int_0^H dh - \frac{1}{H} \int_0^H h dh \right] =$$

$$V_{\dot{N}(h=0)} \left[h \Big|_0^H - \frac{1}{H} \left(\frac{h^2}{2} \Big|_0^H \right) \right] = V_{\dot{N}(h=0)} \cdot \left(H - \frac{H}{2} \right) = \frac{V_{\dot{N}(h=0)} \cdot H}{2}. \quad (6)$$

Одновременно, значение V_{OC} может быть вычислено по объему ковша i_K и значениям ψ и $\psi' = \psi_{ГР}$ (коэффициентам заполнения ковша на высотах $h=0$ и $h=H$ соответственно):

$$V_{\dot{N}} = i_E (\psi - \psi_{AD}) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Из выражения (6) найдем объем СМ, осыпавшегося из ковша в начале его вертикального перемещения, т.е. при $h=0$:

$$V_{\dot{N}(h=0)} = 2V_{\dot{N}} / H. \quad (8)$$

Переходя к производительности осыпания СМ из ковша, как функции времени, получим:

$$Q'_{\dot{N}}(t) = Q'_{\dot{N}(t=0)}(1 - t/t_I), \quad Q'_{\dot{N}(t=0)} = 2V_{\dot{N}} / t_I, \quad (9)$$

где t_{II} – время вертикального перемещения ковша.

В выражениях (9) производительность осыпания СМ соответствует точке положения ковша. Для учета влияния этого осыпания на уровень $h_{СМ}$ СМ в башмаке нории необходимо привести его к этому уровню, т.е. учесть время падения осыпавшегося СМ от ковша до этого уровня. Будем считать это падение свободным, тогда время падения t_{II} осыпавшегося СМ будет определяться из выражения:

$$t_{II} = \sqrt{2h_i / g}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения.

Схематически изобразим падение СМ при осыпании его в башмак нории в различные моменты времени t_i , $i \in (2, 7)$ движения ковша, см. рис. 2.

Рисунок 2 наглядно иллюстрирует то, что производительность осыпания СМ на уровне $h_{СМ}$ в башмаке $Q_{OC}(t)$ отстает от производительности осыпания этого СМ непосредственно из ковша $Q'_{\dot{N}}(t)$ на величину запаздывания, распределенного по высоте подъема. Для упрощения моделирования заменим модель с распределенными параметрами моделью с сосредоточенными параметрами, для чего опишем величину такого запаздывания дифференциальным уравнением. На рис. 2б, по сути дела, представлена скоростная характеристика канала « $Q'_{\dot{N}} - Q_{OC}$ », которая показывает, что в качестве такого уравнения может быть взято дифференциальное уравнение первого порядка:

$$T_{OC} \frac{dQ_{\dot{N}}(t)}{dt} + Q_{\dot{N}}(t) = Q'_{\dot{N}}(t), \quad (11)$$

или в операторной форме, т.е. в форме инерционного статического звена первого порядка:

$$W_{iN}(p) = Q_{iN}(\delta) / Q_{iN}(\delta) = 1 / T_{iN} \delta, \quad p \equiv d/dt, \quad (12)$$

где $T_{OC} \approx 0,3t_l$ – постоянная времени инерционного звена.

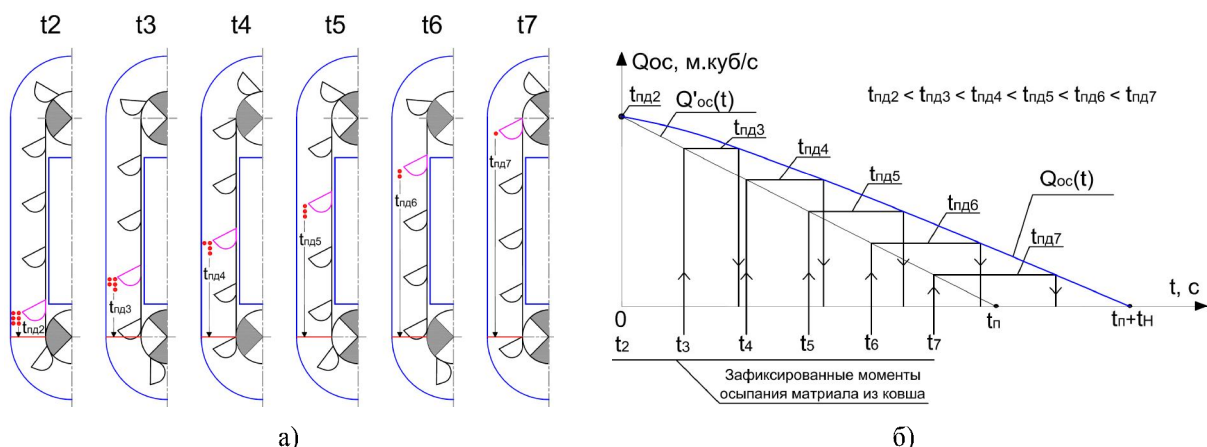


Рис. 2 – Схема осыпания СМ из ковша норрии на различной высоте его подъема в моменты времени $t_i, i \in (2,7)$, обуславливающей различное время падения $t_{пд}$ осыпавшегося СМ от ковша до уровня h_{CM} – «а», интерполяция времени падения – «б»

3 Моделирование сил сопротивления движению ленты

Сила W_M , создаваемая перемещением СМ в ковшах на вертикальном участке. В соответствии с тяговым расчетом норрии [4, стр. 247–249] сила сопротивления, создаваемая массой материала на участке подъема, определяется из выражения:

$$W_M = gq_{CM}H, \quad (13)$$

где q_{CM} – погонная масса материала.

Очевидно, что при моделировании значение этой силы необходимо рассматривать как функцию времени, величина которой будет зависеть от изменяющейся массы $m_{iN}^{IE}(t)$, см. выражение (3). Окончательно:

$$W_i(t) = gm_{iN}^{IE}(t) = gc_{iN} \int_t^{t+t_l} (Q_{iO\delta}(t) - Q_{iN}(t) - Q_{A\delta O}(t)) dt. \quad (14)$$

Сила $W_{уд}$, создаваемая соударением частиц осыпающегося СМ и поднимающихся ковшей с продуктом. Очевидно, что величина этой силы может быть оценена только в самом первом приближении. При этом будем пользоваться следующими соображениями:

$$W_{уд} = p/\Delta t, \quad (15)$$

где p – импульс силы частицы массой m и скоростью V , Δt – время взаимодействия частицы с ковшом.

$$p = mV. \quad (16)$$

Предположим, что из всего потока СМ, осыпавшегося из ковша, 50 % частиц потока попадает в зазор между трубой норрии и ковшами и не сталкивается с ними, а 50 % – соударяется с поднимающимся последующим ковшом. Схема таких соударений представлена на рис. 3, где m_i – масса осыпавшегося СМ из i -го ковша.

Последовательно, «сверху–вниз», начиная с ковша № 5, рассмотрим соударения частиц СМ с ковшами и найдем импульсы силы.

$i=5$. В силу принятых ранее допущений о характере осыпания СМ, осыпания из ковша на полной высоте подъема H не происходит, поэтому $p_4 = 0$.

$i=4$. Из ковша № 4 осыпается масса СМ, равная m_4 . $0,5m_4$ попадает на ковш № 3. Высота падения равна h_A – расстоянию между соседними ковшами. Тогда: $p_3 = 0,5m_4V_K, V_K = \sqrt{2gA_E}$.

$i=3$. Из ковша № 3 осыпается масса СМ, равная m_3 . Половина потока СМ с ковша № 3 ($0,5m_3$) падает на ковш № 2 со скоростью $V_K = \sqrt{2gA_E}$. «Половина половины» потока с ковша № 4, пролетевшая мимо ковша № 3, падает на ковш № 2 со скоростью $V'_K = \sqrt{2gA_E} \cdot 2 = V_K \cdot \sqrt{2}$.

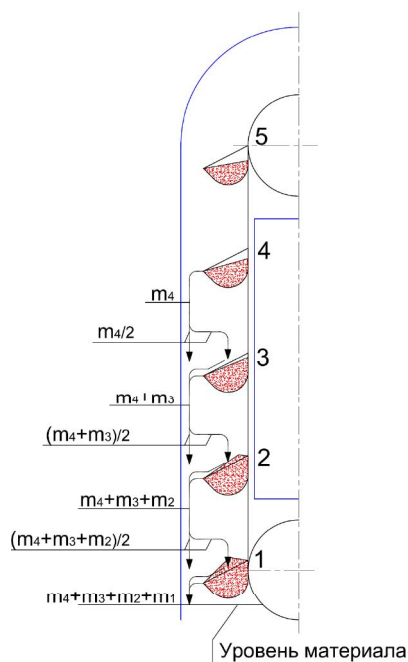


Рис. 3 – Схема соударений частиц осыпающегося СМ с ковшами нории

«Половина половины» потока с ковша № 4, попавшая в ковш № 3, осыпаясь из него, попадает на ковш № 2, имея скорость V_K . Тогда: $p_2 = \frac{m_3}{2} V_K + \frac{m_4}{4} V_K + \frac{m_4}{4} V_K \sqrt{2} = \frac{V_K}{2} \left(m_3 + \frac{m_4}{2} (1 + \sqrt{2}) \right)$.

$i=2$. Рассматривая аналогичную, но более длинную, чем при $i=3$, схему для ковша № 1, получим:

$$p_1 = \frac{m_2}{2} V_K + \frac{m_4}{4} V_K + \frac{m_3}{4} V_K + \frac{m_4}{4} V_K \sqrt{3} + \frac{m_3}{4} V_K \sqrt{2} = \frac{V_K}{2} \left(m_2 + \frac{m_4}{2} (1 + \sqrt{3}) + \frac{m_3}{2} (1 + \sqrt{2}) \right).$$

Тогда суммарный импульс силы от падения части СМ на поднимающиеся ковши можно вычислить из выражения:

$$p = \frac{V_K}{2} m_4 + \frac{V_K}{2} \left(m_3 + \frac{m_4}{2} (1 + \sqrt{2}) \right) + \frac{V_K}{2} \left(m_2 + \frac{m_4}{2} (1 + \sqrt{3}) + \frac{m_3}{2} (1 + \sqrt{2}) \right) = \frac{V_K}{4} [m_4 (4 + \sqrt{2} + \sqrt{3}) + m_3 (3 + \sqrt{2}) + m_2 2].$$

Для произвольного количества n ковшей выражение для суммарного импульса силы (опуская промежуточные преобразования), можно представить в виде:

$$p = \frac{V_K}{2} \sum_{i=1}^{n-1} m_i \left(\left(i + \sum_{k=1}^i \sqrt{k} \right) / 2 \right) = \frac{V_K}{4} \sum_{i=1}^{n-1} m_i \left(i + \sum_{k=1}^i \sqrt{k} \right), \quad (17)$$

а с учетом принятого характера осыпания, см. (2), выражение (17) принимает вид:

$$p = \frac{V_K m_{\hat{E}}}{4} \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i A_{\hat{E}}}{n A_{\hat{E}}} \right) \left(i + \sum_{k=1}^i \sqrt{k} \right) = \frac{V_K m_{\hat{E}}}{4} \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n} \right) \left(i + \sum_{k=1}^i \sqrt{k} \right). \quad (18)$$

Сомножитель в виде суммы выражения (18) определяется только конструктивными особенностями нории, а именно – количеством ковшей на восходящей ветви ее ленты, и не зависит от текущих характеристик ее работы. В этом случае эту сумму можно представить в виде постоянного для каждой нории коэффициента, значение которого будет зависеть только от n .

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n} \right) \left(i + \sum_{k=1}^i \sqrt{k} \right) / 4. \quad (19)$$

Для упрощения вычисления этого коэффициента, т.е. для предотвращения необходимости реализации в алгоритме вычисления циклических процедур, $f(n)$ был аппроксимирован квадратным трехчленом (использовалась стандартная процедура «Excel», инструмент – «поиск решений»):

$$f(n) \approx 0,17n^2 - 0,88n + 2,48. \quad (20)$$

С учетом (19) и (20) выражение (18) можно записать в виде:

$$p = V_K m_{1\dot{E}}(n), \quad (21)$$

где V_K – скорость, которую достигает частица осыпавшегося СМ при «пролете» расстояния A_K ; $m_{1\dot{E}}$ – масса СМ, осыпавшегося с первого ковша по ходу движения ленты. Отметим, что 50 % осыпавшегося из этого ковша СМ попадает в следующий за ним ковш, т.е. ковш, выходящий из слоя СМ в башмаке норрии. Значение $m_{1\dot{E}}$ вычисляется из выражения:

$$m_{1\dot{E}} = V_{i\dot{N}(h=0)} \cdot \rho_{\dot{N}i} (1 - A_{\dot{E}} / H), \quad (22)$$

где $V_{i\dot{N}(h=0)}$ – объем СМ, осыпавшегося из ковша в начале его вертикального перемещения, с учетом выражений (7) и (8), может быть рассчитан из выражения:

$$V_{i\dot{N}(h=0)} = 2i_{\dot{E}} (\psi - \psi_{AD}) 10^{-3} / H. \quad (23)$$

Рис. 4 иллюстрирует изменение импульса силы сопротивления $W_{y\dot{D}}$, создаваемой соударением частиц осыпавшегося СМ и поднимающихся ковшей с момента начала загрузки норрии на интервале подъема ковшей [$i = 0, i = n = 20$], что соответствует интервалу времени [$t = 0, t = t_{II}$].

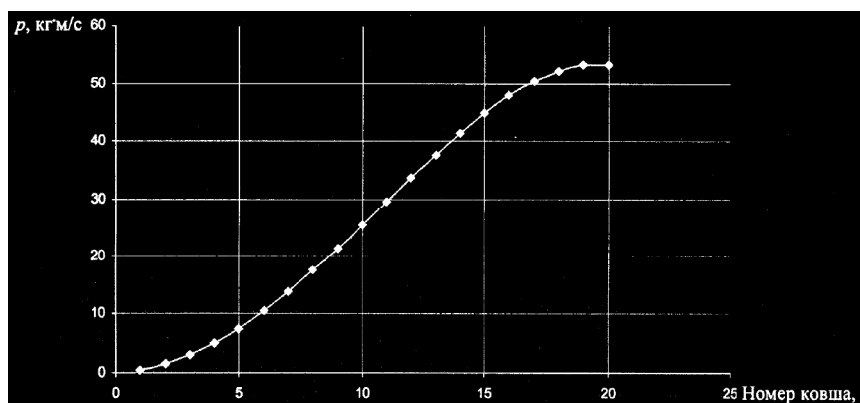


Рис. 4 – Изменение импульса силы сопротивления со стороны осыпавшегося СМ при заполнении норрии материалом

Для упрощения моделирования процесса, и окончательно заменяя модель с распределенными параметрами моделью с сосредоточенными параметрами, перейдем в расчете p от аргумента i к аргументу t . График функции $p(i)$ при фиксированной скорости V_L ленты, по сути, представляет собой переходную характеристику норрии как ОУ по каналу « $Q_{BX} - p$ ». Его анализ показывает, что эта переходная характеристика может быть описана дифференциальным уравнением достаточно высокого порядка. Поскольку в ходе моделирования процесса уже принято много допущений и упрощений, то в данном случае ограничимся дифференциальным уравнением второго порядка с запаздывающим аргументом:

$$\ddot{\dot{E}i} \frac{d^2 p(t)}{dt^2} + 2\dot{\dot{E}i} \frac{dp(t)}{dt} + p(t) = m_{1\dot{E}} (t - \tau_{\dot{E}i}) V_{\dot{E}} f(n), \quad (24)$$

или в операторной форме, т.е. в форме инерционного статического звена второго порядка с запаздыванием:

$$W(p) = \frac{\dot{E}i}{(\dot{\dot{E}i} p + 1)^2} \exp(-\tau_{\dot{E}i} p). \quad (25)$$

где T_{IM} и τ_{IM} соответственно постоянная времени и время запаздывания модели динамики канала « $Q_{BX} - p$ ». Применение методики Митинной для обработки переходных характеристик [5], метод «двух общих точек», дает следующие результаты: $T_{IM} \approx 0,65t_{II}$, $\tau_{IM} \approx 0,2t_{II}$.

Сила $W_{3ч}$, создаваемая при перемещении ковшей через слой СМ в башмаке норрии в процессе зачерпывания СМ, см. [1]. Эта сила зависит от физико-механических свойств перемещаемого СМ, скорости движения ковшей, их типа и шага, степени их заполнения СМ и других факторов. В литературе по подъемно-транспортному оборудованию ее рассчитывают приближенно по следующей формуле

$$W_{3ч} = C_{3ч} q, \quad (26)$$

где q – погонная нагрузка на ленту конвейера, кг/м; $C_{3ч}$ – коэффициент сопротивления при зачерпывании (этот коэффициент численно равен работе, совершаемой при зачерпывании СМ массой 1 кг).

В различных источниках рекомендуются различные, но всегда приближенные, значения $C_{3ч}$. Так, в [2, стр. 85], для зерна рекомендуется его выбирать в зависимости от скорости V_L ленты норрии, в соответ-

ствии с таблицей:

$V_{л}, \text{ м/с}$	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$C_{3ч}, \text{ Нм/кг}$	–	9,5 – 24	10 – 26	13 – 32	21 – 44

В [3, стр. 460] значение $C_{3ч}$ рекомендуется выбирать в зависимости от скорости ленты и типа СМ: для скорости $V_{л} = 1...1,25 \text{ м/с}$ при транспортировании порошковых и мелкокусковых СМ $C_{3ч} = 15...20 \text{ Нм/кг}$, а при транспортировании среднекусковых СМ – $C_{3ч} = 20 \div 50 \text{ Нм/кг}$. В [4, стр. 248], подход аналогичен, но там, для среднекусковых СМ значение коэффициента сопротивления рекомендуется выбирать из диапазона $C_{3ч} = 40 \div 50 \text{ Нм/кг}$.

Рассмотренные подходы к расчету $W_{3ч}$ для разрабатываемой модели норрии как ОУ неприемлемы. Это связано с тем, что они не рассматривают принципиально важный фактор – влияние высоты $h_{СМ}$ слоя материала в башмаке норрии. О величине этого влияния можно судить по следующим известным фактам: при $h_{СМ}$, соответствующей I-й зоне башмака, $W_{3ч} = 0$, а при $h_{СМ}$, соответствующей IV-й зоне башмака, т.е. при развитии завала в башмаке норрии, $W_{3ч}$ резко возрастает, вплоть до «заклинивания» ленты или ее проскальзывания на приводном барабане, т.е. очевидно, что $W_{3ч} = f(h_{СМ})$.

Для получения этой зависимости в явном виде примем следующие допущения: а) при работе норрии СМ в ее башмаке находится в состоянии, близком к псевдооживленному, т.е. силами трения частиц друг о друга и о конструктивные элементы норрии можно пренебречь; б) основная составляющая $W_{3ч}$ вызвана перемещением СМ, увлекаемого ковшами по траектории своего движения, включая СМ, который расположен между ковшами. Объем этого СМ определим из следующего выражения:

$$V_{I \text{ СМ}} = L_{\text{СМ}} \times B_{\text{СМ}} L_{\text{СМ}}, \quad (27)$$

где $L_{\text{СМ}}$ – длина пути зачерпывания.

Принимаем, что для обоих вариантов загрузки норрии начало $L_{\text{СМ}}$ – это вертикальная ось натяжного барабана, а конец – уровень СМ $h_{СМ}$ в восходящей ветви норрии. Тогда

$$L_{\text{СМ}} = \begin{cases} \left(R_{lA} + \frac{L_{\text{СМ}}}{2} \right) \arccos \left(\frac{h_{lA} - h_{\text{СМ}}}{R_{lA} + L_{\text{СМ}}/2} \right), & \left(h_{lA} - R_{lA} - \frac{L_{\text{СМ}}}{2} \right) < h_{\text{СМ}} < h_{lA} \\ \left(R_{lA} + \frac{L_{\text{СМ}}}{2} \right) \frac{\pi}{2} + (h_{\text{СМ}} - h_{lA}), & h_{\text{СМ}} \geq h_{lA} \end{cases}. \quad (27)$$

Пренебрегая центробежными силами, примем, что $W_{3ч}$ соответствует силе сопротивления, которая соответствовала бы перемещению $L_{\text{СМ}}$ СМ объемом $V_{I \text{ СМ}}$ и насыпной плотностью $\rho_{СМ}$ на вертикальном участке:

$$W_{\text{СМ}} = L_{\text{СМ}} \times V_{I \text{ СМ}} \times \rho_{\text{СМ}} \times g = L_{\text{СМ}} \times L_{\text{СМ}} \times B_{\text{СМ}} \times \rho_{\text{СМ}} \times g. \quad (28)$$

4 Моделирование момента сопротивления на валу приводного электродвигателя (ПЭД) норрии

Помимо рассмотренных выше сил сопротивления $W_{\text{М}}$, $W_{\text{УД}}$ и $W_{3ч}$, связанных с перемещением СМ, на приводной барабан норрии действуют силы, которые непосредственно не связаны с перемещением СМ. Часть этих сил, создающихся массой ленты и пустых ковшей, учитывать не будем, считая, что силы тяжести восходящей и нисходящей ветвей ленты, направленные встречно, полностью компенсируют друг друга. Те силы, которые целесообразно учесть, возникают при огибании лентой норрии натяжного (сила W_{1-2}) и приводного (сила W_{3-4}) барабанов. В [4, стр. 247–249], рекомендуют следующие соотношения для их оценки:

$$W_{1-2} = k_1 S_1 = (0,05 \div 0,07) S_1, \quad S_1 = 1000 \div 2000, \text{ Н}, \quad (29)$$

где k_1 – коэффициент сопротивления при огибании лентой натяжного барабана; S_1 – сила натяжения ленты в точке начала, по ходу ее движения, соприкосновения с натяжным барабаном (является минимальной силой натяжения ленты),

$$W_{3-4} = k_2 P_{\text{ПБ}} = 0,05 P_{\text{ПБ}}, \quad (30)$$

где k_2 – коэффициент сопротивления при огибании лентой приводного барабана; $P_{\text{ПБ}}$ – тяговое усилие на приводном барабане.

Если принять, что на холостом ходу норрии $P_{\text{ПБ}} \approx 0$, то сила W_{1-2} может рассматриваться как сила сопротивления холостого хода, т.е. $W_{1-2} = W_{\text{ХХ}}$. Тогда, в установившемся режиме работы норрии, тяговое усилие на ленту, создаваемое приводным барабаном, будет равно сумме сил сопротивления ее движению:

$$P_{\text{ПБ}} = 1,05(W_{3ч} + W_{\text{М}} + W_{\text{УД}} + W_{\text{ХХ}}). \quad (31)$$

Соответствующий этому усилию крутящий момент на валу приводного барабана, который уравновешивается моментом сопротивления $M_{\text{С}}$, будет равен:

$$M_{ПБ} = M_C = P_{ПБ} R_{ПБ}, \quad (32)$$

а момент сопротивления $M_{C,ДВ}$ на валу ПЭД норрии, численно равный его крутящему моменту $M_{ДВ}$, с учетом соотношения скоростей вращения $N_{ПБ} / N_{ДВ}$ приводного барабана и ПЭД, которое создается редуктором норрии, будет равен:

$$M_{C,ДВ} = M_C N_{ПБ} / N_{ДВ} = M_{ДВ}. \quad (33)$$

5 Реализация и применение ММ норрии. Результаты моделирования

Представленные выше ММ были реализованы в форме имитационных моделей в среде Simulink. Некоторые результаты моделирования, совместно с моделью процесса заполнения ковшей норрии СМ [1] и моделью ПЭД [6], т.е. полной модели норрии типа У13-УН100 при транспортировании зерна пшеницы, при подаче СМ «по ходу», приведены на рис. 5 и 6. См. также рис. 11 в [1].

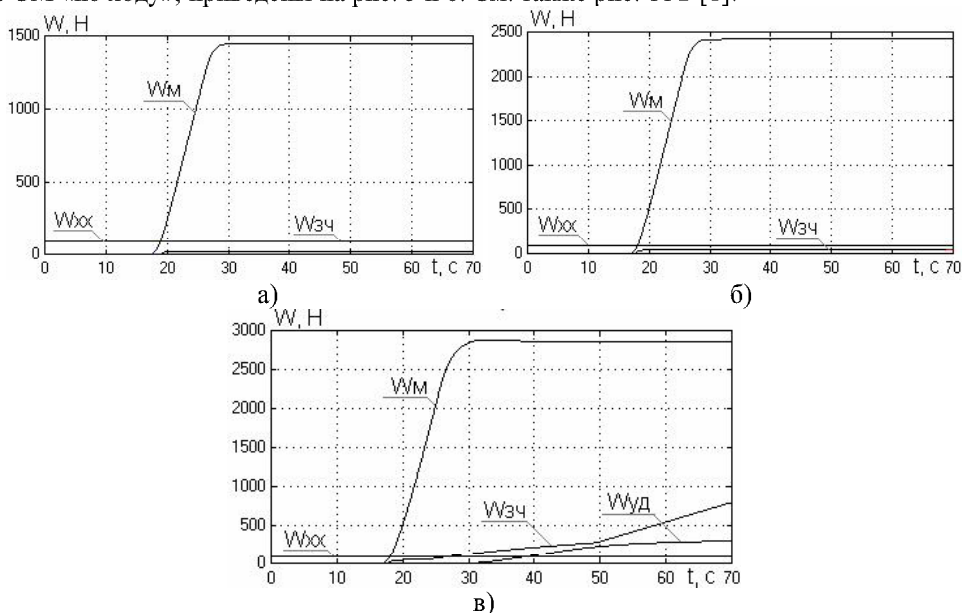


Рис. 5 – Изменение сил сопротивления движению ленты для различных значений входной производительности $Q_{ВХ}$: а) 60т/ч; б) 100 т/ч; в) 140 т/ч

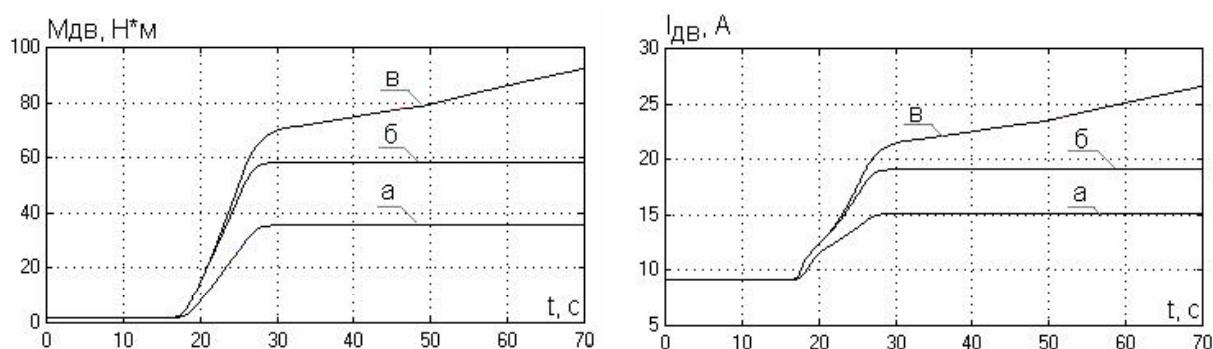


Рис. 6 – Изменение изменения крутящего момента ($M_{ДВ}$) и тока нагрузки ($I_{ДВ}$) ПЭД для различных значений входной производительности $Q_{ВХ}$: а) 60 т/ч; б) 100 т/ч; в) 140 т/ч

Результаты моделирования подтверждают и отражают важнейшую особенность норрии как ОУ. С момента начала осыпания СМ из ковшей при его транспортировке на вертикальном участке, он, из объекта «с самовыравниванием» (см. рис «а» и «б»), т.е. имеющего статические свойства, трансформируется в объект «без самовыравнивания» (см. рис «в»), т.е. имеющего астатические свойства. Это на практике и приводит к развитию завала башмака норрии СМ и прекращению работы поточно-транспортной линии, куда входит норрия, в аварийном режиме.

Предотвратить аварийный останов линии, одновременно обеспечивая ее работу с максимально-возможной загрузкой, может только специальная САУ, для разработки которой и создавалась данная модель.

Литература

1. Хобин В. А. Математическая модель норрии как объекта управления с изменяющимися свойствами. Моделирование процесса заполнения ковшем / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса : 2012. – Вип. 42. – Т. 1. – С. 358–368.
2. Платонов П. Н. Подъемно-транспортные и погрузочно-разгрузочные устройства / П. Н. Платонов, К. И. Куценко // Изд. 2-е, перераб. и доп. – «Колос», М., 1972.
3. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины / М. П. Александров // Учеб. для машиностроит. спец. вузов. – 6-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 1985. – 520 с., ил.
4. Зенков Р. Л. Машины непрерывного транспорта / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов // Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : «Машиностроение», 1987. – 432 с., ил.
5. Минина О. М. Определение динамических характеристик и параметров регулируемых процес сов / О. М. Минина // М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 46 с.
6. Хобин В. А. Моделирование рабочих характеристик приводных асинхронных электродвигателей для задач управления загрузкой оборудования / В. А. Хобин, И. Н. Кирьязов // Наук. пр. ОНАХТ / Міністерство освіти України. – Одеса : 2011. – Вип. 40. – Т. 1. – С. 228–234.

УДК [621.867.3:622.612]:658.5

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОЧНО-ТРАСПОРТНЫМИ ЛИНИЯМИ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ В ПРЕДАВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

Хобин В.А., д-р техн. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса
Шестопапов С.В.
Компания С-инжиниринг, г. Одесса

Рассмотрены последствия аварийных остановов поточно-транспортных линий, вызванных перегревом приводных электродвигателей их конвейеров. Предложен и описан алгоритм автоматического управления, позволяющий, за счет прогнозирования момента срабатывания тепловой защиты, заметить аварийный останов технологическим.

Consequences of emergency break of line-transport lines, which caused of power-driven electric motor overheat their conveyers are considered. Control automatic algorithm, allowing, due to forecasting of operate moment of protection thermal, to replace emergency break by technological break is suggested and described.

Ключевые слова: перегрузка зерна, поточно-транспортные линия, электродвигатель, перегрев, аварийный останов, технологический останов.

1. Постановка задачи. Процессы перегрузки зерна, реализуемые поточно-транспортными линиями (ПТЛ), составляют основную часть технологических процессов (ТП) предприятий, обеспечивающих его приемку, хранение, переработку (подработку) и отгрузку. У зерновых терминалов, обеспечивающих формирование крупных партий зерна и их отгрузку на железнодорожный, речной и морской транспорт, доля таких процессов максимальна. Время выполнения операции перегрузки и энергозатраты на нее определяются производительностью ПТЛ. Максимально достижимая производительность линии ограничена особенностями конструкции и эксплуатации транспортирующего оборудования ПТЛ – конвейеров различных типов, включая ковшовый конвейер для вертикального транспортирования – норию. При ее превышении возникают аварийные ситуации (АС), когда дальнейший процесс перегрузки становится невозможен из-за угрозы перерастания АС в аварию. Такие угрозы ликвидируют специальные устройства аварийной защиты, отключающие конвейер, где возникла АС, и все предшествующие ему конвейеры в аварийном режиме, т.е. без их разгрузки от транспортируемого материала.

Для рассматриваемых ПТЛ существуют два типа АС, связанных с превышением их допустимой производительности. Первый тип АС связан с возникновением завала рабочего пространства из-за превышения допустимого значения его *объемной* производительности. В этом случае для аварийной защиты приводного электродвигателя (ПЭД) этого конвейера и предотвращения развития завалов датчики-реле подпора отключают ПТЛ в аварийном режиме конвейера (событие $S^{ДП}$). Принципиальная особенность ПТЛ, включающих в себя норрии, заключается в том, что именно норрии, как правило, являются их «узким местом» по объемной производительности. В [1, 2] были разработаны принципы эффективного управления ПТЛ, которые позволяют определять ее максимально допустимую загрузку и стабилизировать такую