

Д. А. Хамидуллина, Я. С. Мухтаров, С. Г. Кондрашева

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАБОТЫ
ВИНТОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Ключевые слова: винтовой конвейер, коэффициент заполнения, факторный эксперимент, производительность, мощность.

В работе рассматривается задача определения оптимальных параметров шнековых конвейеров при перемещении дисперсных материалов для случаев неполного заполнения корпуса. С использованием полного факторного эксперимента получены формулы производительности и потребляемой мощности конвейера в зависимости от пяти факторов.

Keywords: helical conveyor, fill factor, factorial experiment, productivity, capacity.

The problem of determining the optimum parameters of screw conveyors for moving particulate materials in the cases of incomplete filling of the case. Using a full factorial experiment to obtain formulas of performance and power consumption of pipeline based on five factors.

В производственных процессах, связанных с переработкой сыпучих сред, существенную роль играют винтовые конвейеры [1]. При исследовании и разработке методов расчета аппаратов с винтовым каналом необходимо учитывать варианты частичного заполнения желоба. В таких случаях материал перемещается в желобе порциями, расположенными через шаг S .

Существующие общеизвестные методы расчета шнековых аппаратов не учитывают некоторые особенности движения материала в желобе, например, различие в поведении потока в канале шнекового аппарата при малых и больших коэффициентах заполнения и частотах вращения. Расчетные же зависимости предлагаются для какого-то одного постоянного режима движения, при этом не обращается внимания на то, что изменение одного параметра (например, коэффициента заполнения желоба φ от 0,2 до 0,8) резко меняет характер движения потока в канале. Расчеты, проведенные по градационным формулам для тихоходных конвейеров, дают в 1,3-1,5 раза завышенные значения производительности и в 1,5-3 раза заниженные значения мощности по сравнению с экспериментальными значениями [2].

Для расчета мощности во многих литературных источниках используется формула:

$$N = Q(l_w \pm H) / 367 \quad (1)$$

где Q – производительность, т/час; H – высота подъема материала, м.

Численные значения коэффициента сопротивления W определяются из опыта эксплуатации, в основном, горизонтальных шнековых аппаратов с конкретными параметрами и режимами работы, по этой причине они не могут быть с достаточной точностью распространены на аппараты с любыми другими параметрами. Проведенные исследования позволили выявить два режима движения дисперсной среды в винтовом канале. При первом режиме материал перемещается поступательно, при второй – наблюдается интенсивное винтовое движение материала вокруг оси винта.

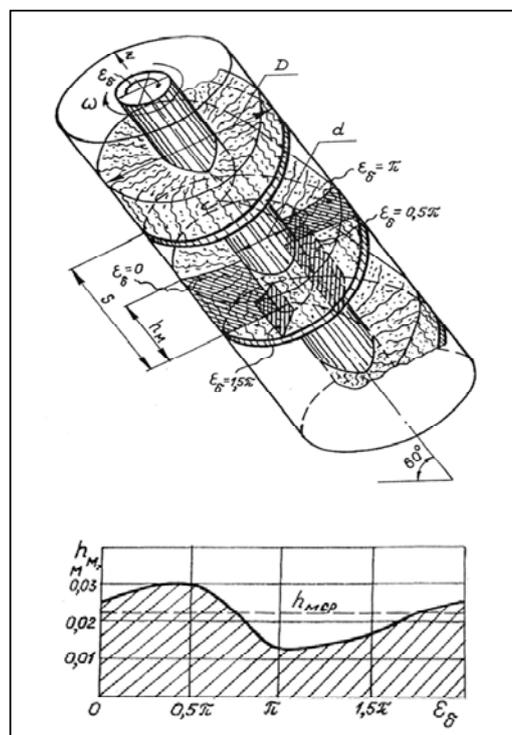


Рис. 1 – Схема расположения сыпучего материала на винтовой поверхности рабочего органа, $\delta = 60^\circ$, $n = 240$ об/мин, $\varphi = 0,59$, $K_s = 1,0$

Первый режим характерен для горизонтальных и пологонаклонных шнековых аппаратов (угол наклона аппарата к горизонту $\delta = 6-20^\circ$) с коэффициентом заполнения $\varphi \leq 0,4-0,45$, $K_s = S/D = 0,6-1,0$ и частотой вращения винта n до 400-500 об/мин, D – диаметр винта. При этих параметрах дисперсный материал под действием винтовой поверхности перемещается вдоль желоба порциями между лопастями, и частично перебрасывается через винт. Поток в этом случае не сплошной, а при малых φ может быть и разрывным. При больших значениях K_s ($K_s > 1,0$), т.е. при увеличении угла подъема винтовой поверхности, даже при малых коэффициентах заполнения дисперсный материал уси-

ленно перебрасывается через вал винта и вовлекается во вращательное движение.

Второй режим наблюдается для пологонаклонных, крутонаклонных и вертикальных шнековых аппаратов ($25-30^{\circ} < \delta < 90^{\circ}$) практически при любых n , но с коэффициентами заполнения $0,5-0,6 < \varphi < 0,9-1,0$; а также для горизонтальных шнековых аппаратов при $n > 200$ об/мин и $\varphi > 0,6$. При этих параметрах движение дисперсного материала происходит преимущественно по винтовым траекториям, он располагается по всему периметру желоба, если частота вращения винта достаточно высокая (рис.).

Из рис. видно, что дисперсный материал располагается слоем наибольшей толщины со стороны восходящего (если рассматривать поперечное сечение аппарата) потока, т.е. при $\varepsilon_{\delta} = (0-0,50)\pi$. Этим объясняется наибольший нарост на желобе, например, суперфосфата после его длительного транспортирования в областях $\varepsilon_{\delta} = (0-0,50)\pi$. Поэтому в случаях, когда перемещается материал, склонный к намазыванию на винт и желоб, необходимо предусмотреть конструкцию желоба такой, чтобы он имел возможность фиксированного поворота вокруг собственной оси.

Максимальная толщина слоя при $\varepsilon_{\delta} = 0,50\pi$ составляет примерно $0,6S$, минимальная при $\varepsilon_{\delta} = \pi - (0,2-0,3)S$. Этого соотношения, практически, достаточно для получения нормальной производительности, так как при таком потоке условия для осыпания материала в зазоре между винтом и желобом резко уменьшаются.

В вертикальных шнековых аппаратах толщина слоя h_m при любых параметрах и ε_{δ} есть величина постоянная.

Для выявления особенностей движения материала в аппарате с неполным заполнением и расчета его характеристик, был проведен плановый многофакторный эксперимент [3]. В опытах варьировалось пять факторов: Z_1 – истинная площадь живого сечения канала $F_{ист}$, Z_2 – окружная скорость вращения винта $v = \pi(D+d)n/120$ по среднему диаметру винтовой поверхности, Z_3 – коэффициент заполнения φ , Z_4 – отношение угла наклона шнекового аппарата к горизонту δ к максимальному углу наклона $\delta_{max} = 90^{\circ}(\delta/\delta_{max})$ и Z_5 – отношение коэффициента трения скольжения дисперсного материала о винт и желоб f_c к коэффициенту внутреннего трения материала $f_{вн}$ ($f_c/f_{вн}$). Под фактором ($f_c/f_{вн}$), были заложены различные дисперсные материалы, использованные в эксперименте.

Откликами являлись производительность и потребляемая мощность.

Эксперимент проводили на двух уровнях, была применена полуреплика от полного факторного эксперимента 2^5 .

Нижние ($-Z_j$), верхние ($+Z_j$) и основные Z_j^0 уровни и интервалы варьирования ΔZ_j , факторов Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 и Z_5 приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Варьируемые факторы

Уровни и интервалы варьирования факторов	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
	$F_{ист} \cdot 10^{-4}$	v	φ	δ/δ_{max}	$f_c/f_{вн}$
	m^2	m/c	-	-	-
Нижний, ($-Z_j$)	3,8220	0,414	0,30	0	0,56
Верхний, ($+Z_j$)	8,5350	2,072	1,00	1,0	0,74
Основной, (Z_j^0)	6,1785	1,243	0,65	0,5	0,65
Интервал варьирования, (ΔZ_j)	2,3565	0,829	0,35	0,5	0,09

От системы координат Z_1, Z_2, \dots, Z_k произведен переход к безразмерной системе координат X_1, X_2, \dots, X_k путем их линейного преобразования.

Для описания влияния указанных факторов на производительность и мощность в первом приближении был взят линейный полином с эффектами парного взаимодействия.

Коэффициенты регрессионных уравнений, дисперсии воспроизводимости, адекватности и среднеквадратичные отклонения были найдены по известным рекомендациям [3].

После перехода к натуральному масштабу получены формулы для расчета производительности и потребляемой мощности винтового конвейера:

$$\begin{aligned}
 Q = & -0,896 + 0,178F_{ист} + 0,347v - 0,29\varphi - \\
 & - 0,27 \delta/\delta_{max} + 1,506 f_c/f_{вн} + 0,06026F_{ист} v + \\
 & + 0,0708F_{ист} - 0,039F_{ист} \delta/\delta_{max} - \\
 & - 0,318F_{ист} f_c/f_{вн} + 0,335v\varphi - 0,178v \delta/\delta_{max} \\
 & - 0,728v f_c/f_{вн} - 0,413\varphi \delta/\delta_{max} + \\
 & + 1,184 \delta/\delta_{max} f_c/f_{вн}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N = & 13,78 - 1,74F_{ист} - 0,28v + 9,5\varphi - \\
 & - 17,25 \delta/\delta_{max} - 7,31f_c/f_{вн} + 1,2F_{ист} v + \\
 & + 2,22F_{ист} \varphi - 0,4F_{ист} \delta/\delta_{max} + 12,1v\varphi - \\
 & - 11,93v f_c/f_{вн} - 3,83\varphi \delta/\delta_{max} - \\
 & - 31,55\varphi f_c/f_{вн} - 34,22 \delta/\delta_{max} f_c/f_{вн}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Адекватность полученных уравнений эксперименту была оценена при помощи критерия Фишера (F). При расчете $Q-F=1,59$, при расчете $N-F=2,31$, табличное значение $F=2,5$.

Сравнением экспериментальных Q , N ,

Q , N установлено, что выбранный аппроксимирующий полином с достаточной для инженерной практики точностью (до 15%) описывает влияние различных факторов на производительность и потребляемую мощность шнекового аппарата

При очень низких значениях Q и N параметрическая чувствительность уравнений уменьшается, так как ошибки становятся соизмеримыми с диапазонами изменений производительности и мощности.

Наиболее значимыми являются второй и третий факторы – окружающая скорость винта и коэффициент заполнения. В химической технологии частыми являются случаи, когда необходимо регулировать производительность аппарата. Проще это сделать, если варьировать этими двумя факторами: в привод аппарата желательнее включить вариатор, между загрузочным бункером и загрузочным отверстием конвейера устанавливать шибер для регулирования потока.

Полученные формулы для расчета производительности и потребляемой мощности и проведенные экспериментальные исследования позволяют реализовать задачу по оптимизации геометрических и режимных параметров шнекового аппарата.

Наилучшим критерием оптимальности является удельная энергоёмкость $R = N/(QI)$, т.е. энергия N , затраченная при перемещении материала шнековым аппаратом с производительностью Q на длину l .

Необходимым условием экстремума (минимума энергоёмкости) будет равенство нулю частных производных критерия оптимальности по всем пяти факторам.

Обозначив постоянные коэффициенты уравнений (2) и (3), соответственно, через $q_0, q_1, q_2, \dots, q_{45}$ и $n_0, n_1, n_2, \dots, n_{45}$, а факторы через x_1, \dots, x_5 , эти уравнения запишем в виде:

$$Q = q_0 + q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 x_3 + q_4 x_4 + q_5 x_5 + q_{12} x_1 x_2 + q_{13} x_1 x_3 + q_{14} x_1 x_4 + q_{15} x_1 x_5 + q_{23} x_2 x_3 + q_{24} x_2 x_4 + q_{25} x_2 x_5 + q_{34} x_3 x_4 + q_{35} x_3 x_5 + q_{45} x_4 x_5, \quad (4)$$

$$N = n_0 + n_1 x_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3 + n_4 x_4 + n_5 x_5 + n_{12} x_1 x_2 + n_{13} x_1 x_3 + n_{14} x_1 x_4 + \quad (5)$$

$$+ n_{15} x_1 x_5 + n_{23} x_2 x_3 + n_{24} x_2 x_4 + n_{25} x_2 x_5 + n_{34} x_3 x_4 + n_{35} x_3 x_5 + n_{45} x_4 x_5.$$

Тогда условие минимума энергоёмкости запишется в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \partial R / \partial x_1 &= 0 \\ R / x_2 &= 0 \\ R / x_3 &= 0. \\ R / x_4 &= 0 \\ R / x_5 &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

После дифференцирования и определения коэффициентов уравнений окончательно получим систему нелинейных уравнений, определяющих минимум критерия оптимальности.

Система уравнений была решена методом Ньютона-Рафсона. Результат показал, что оптимальными являются следующие значения факторов:

$$x_1 = 5,472, x_2 = 1,426, x_3 = 0,642, x_4 = 0,0803, x_5 = 0,530.$$

Промышленным предприятиям можно рекомендовать режимы, при которых будет наблюдаться наиболее эффективная работа шнековых аппаратов:

$$K_s = S/D = 0,9-1,1, n = 600-800 \text{ об/мин}, \varphi = 0,6-0,7, \delta = 0-10^0.$$

При проведении экспериментов также было оценено влияние промежуточных опор на эффективность перемещения дисперсной среды. Производительность аппарата с опорой во всех случаях меньше производительности шнекового аппарата без опоры, а необходимая мощность, наоборот, выше. Разница больше для материалов с большими значениями f_c и плотности ρ . Так, для шнекового аппарата, перемещающего, например, просо, производительность меньше на 3-4%, мощность же увеличивается в 1,1-1,68 раза (при $\delta = 0-10^0$); при транспортировании, например, песка те же характеристики изменяются, соответственно, на 7-25% и в 1,5-2,4 раза (при $\delta = 0-10^0$). Это объясняется тем, что для материалов с большими значениями f_c и ρ (0,5-0,65 и 1000-2000 кг/м³) в зоне опоры за счет большего трения и уменьшения поперечного сечения канала, в котором движется поток, коэффициент заполнения увеличивается в большей степени, нежели для материалов с низкими значениями тех же параметров. За счет большего φ у опоры скапливается и большее количество материала

Шнековые аппараты с частотой вращения винта $n > 400-500$ об/мин, а также с малыми $n \approx 10-200$ об/мин, но с большими значениями $\varphi \approx 0,6-0,9$ могут быть использованы для перемещения любых материалов и при любых δ , включая вертикальные шнековые аппараты. Их использование желательнее без промежуточных опор.

Таким образом, проведенный многофакторный эксперимент позволил, во-первых, выявить некоторые особенности движения потока дисперсного материала в винтовых каналах, во-вторых, получить уравнения, описывающие влияние, практически, всех факторов на производительность и потребляемую мощность шнекового аппарата при его неполном заполнении ($\varphi < 1,0$), в-третьих, оценить наиболее эффективные для использования в производстве диапазоны изменения параметров аппарата.

Литература

1. Новширванов, А.Г. Моделирование движения дисперсных сред в шнековых аппаратах химической технологии и методы расчета их производительности. Дисс. канд. техн. наук, КХТИ им. С.М. Кирова, Казань, 1988. 212 с.
2. Михайлов, Н.М. К вопросу исследования винтовых конвейеров /Н.М. Михайлов, В.А. Лашков, Я.С. Мухтаров, С.Н. Михайлова //Вестн. Казан. гос. технол. ун-та. – 2010. – №11. – С. 503-506.
3. Ахназарова, С.Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии /С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров – М: Высш. шк., 1978. – 319 с.

© Д. А. Хамидуллина – старш. препод. каф. машиноведения КНИТУ; Я. С. Мухтаров – д.т.н., профессор каф. машиноведения КНИТУ; С. Г. Кондрашева – к.т.н., доцент каф. машиноведения КНИТУ, lashkov_dm@kstu.ru.