

УДК 622.64:622.83

**В.И. Галкин, С.В. Громов**

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
СЫПУЧЕГО ГРУЗА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ  
В ТРУБЧАТОМ СКРЕБКОВОМ КОНВЕЙЕРЕ**

Семинар № 15

Уравнения напряженного состояния сыпучей среды в цилиндрической системе координат  $z, r, \theta$ , может быть записано согласно работе [1], где  $r$  – радиальная координата (расстояние от центра окружности поперечного сечения трубы конвейера);  $\theta$  – угловая координата в плоскости поперечного сечения трубы;  $z$  – продольная координата, совпадающая с направлением транспортирования рис. 1, а, б.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= F_r, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= F_\theta, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= F_z, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  – нормальные напряжения сжатия в направлениях  $r, \theta, z$ ;  $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r}, \tau_{z\theta} = \tau_{\theta z}, \tau_{rz} = \tau_{rz}$  – касательные напряжения в соответствующих плоскостях (попарно равные согласно закону парности касательных напряжений);  $F_r, F_\theta, F_z$  – внешние силы, действующие в каждой точке сыпучей среды по соответствующим направлениям, приведенные к единице ее объема (объемные силы).

Система уравнений (1) описывает статическое равновесие элементарного объема сыпучей среды объемом  $dv = r dr d\theta dz$  (рис. 2). Угол  $\theta$  отсчитывается от вертикальной оси  $y$ , направленной вниз, против часовой стрелки.

Если рассматривать напряженное состояние груза в поперечном сечении в прямоугольной системе координат  $x$  и  $y$ , где  $x$  – горизонтальная ось,  $y$  – ось, лежащая в вертикальной плоскости, перпендикулярная оси  $z$  и направленная вниз на не вертикальных участках конвейера (рис. 1), то для перехода к этой системе координат можно использовать соотношения:

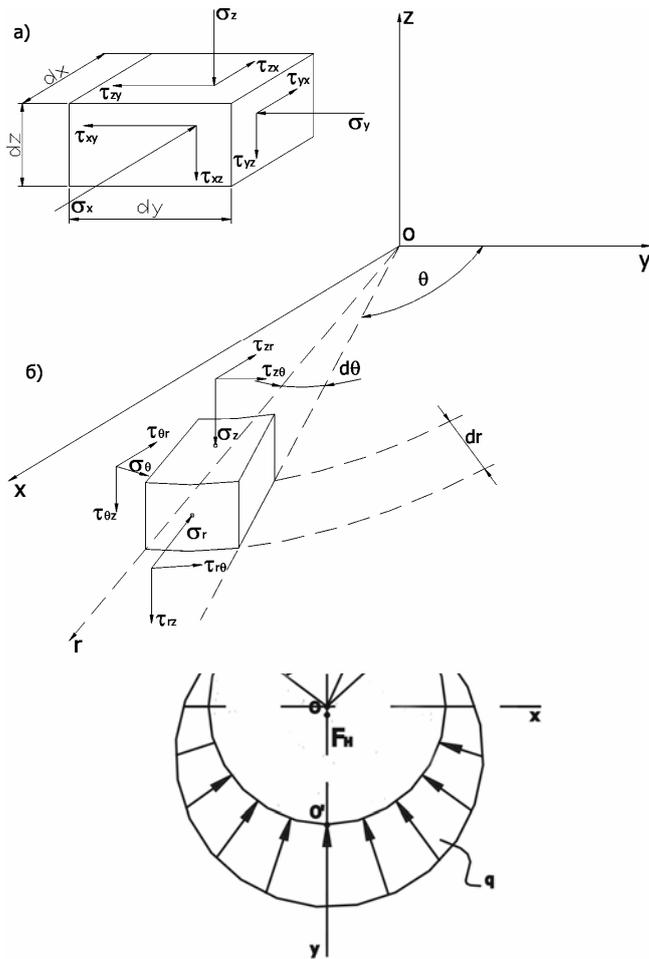
$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_r \sin^2 \theta, \\ \sigma_y &= \sigma_r \cos^2 \theta, \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy} = \sigma_r \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \right\} (2)$$

На рис. 2. также показана схема напряжений, действующих на элементарный объем сыпучей среды, расположенный в прямоугольной системе координат (элементарный параллелепипед объемом  $dv = dx dy dz$ ). Значения внешних объемных сил из системы уравнений (1) могут быть записаны в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} F_r &= -\rho g \sin \beta - \sigma_r f_{CT} \delta(r - R_T), \\ F_\theta &= -\rho g \cos \beta \sin \theta, \\ F_z &= -\rho g \cos \beta \cos \theta, \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $\rho$  – плотность груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – угол наклона трубы конвейера к горизонтали;  $f_{CT}$  – коэффициент трения груза о стенки трубы;  $\delta(r)$  – дельта-функция Дирака.

Строго говоря, последний член в первом уравнении системы (3), отражает не объемные силы, а граничные условия на поверхности груза, соприкасающегося с трубой, но он введен здесь через дельта-



**Рис. 1. Распределение действующих в оточке конвейера перед волочением углеродистых сталей по радиусу; а) в цилиндрической системе координат; б) в полярной системе координат; 1 – труба; 2 – впереди идущий скребок; 3 – перемещающий скребок; 4 – передний фронт тела волочения**

форму диска изготавливают из пластмассы или полиуретана, поэтому силами трения возникающими на поверхности скребка (диска) можно пренебречь. Эпюра давления груза на этот скребок  $q_{II}$  не известна, как и эпюра давления груза на впереди идущий скребок  $q_0$ . Последнюю можно определить, если, согласно работы [2], условно продолжить свободную поверхность порции груза за пределы впереди идущего скребка до пересечения с контуром трубы конвейера и рассматривать полное тело волочения, не ограниченное передним скребком (рис. 3, а). В этом случае эпюру продольного давления в сечении тела волочения скребком можно приближенно отождествить с эпюрой давления на скребок [2].

Ввиду того, что передний скребок тянет следующий за ним, даже при полностью заполненном грузом пространстве между скребками, то очевидно, что давление груза на передний скребок  $q_0$  нужно считать равным нулю по меньшей мере в самой верхней точке его сечения А (рис. 3, б). Очевидно, что на имеющих вертикальных участках трассы конвейера, такой одной верхней точки не существует и давление на передний скребок будет равно нулю по всей его поверхности.

функцию для того, чтобы в системе уравнений напряженного состояния сыпучего груза было видно, в каких уравнениях присутствуют силы трения, а в каких – нет. Что касается других граничных условий, то в них, напротив, силы трения не определены. Эти граничные условия определяются в основном геометрическими и кинематическими связями порции транспортируемого груза с перемещающим и впереди идущим скребками, а также с тяговой цепью.

С перемещающим скребком жестко связана принятая нами система координат обычно скребки конвейера, имеющие

Таким образом, необходимо сначала рассматривать напряженное состояние полного тела волочения, состоящего из полного столба длиной  $l_n$  и наклонной части длиной  $l_n$ , а затем для нахождения сил сопротивления движению груза суммировать силы его трения о стенки трубы лишь на длине, равной интервалу между скребками  $l_c$  (рис. 3, а), так как сила давления груза на передний скребок  $q_n$  характеризует лишь внутренний распор в порции груза и не влияет на баланс внешних продольных сил (см. рис. 1). Соотношение между  $l_n$  и  $l_c$  зависит от принятого шага скребков и степени заполнения трубы.

Если пространство между скребками заполнено грузом не полностью, т.е.  $l_c < l_n$  (см. рис. 3, а), то будем иметь два принципиально разных контура поперечного сечения груза: на участке длиной  $l_n$  – круговой контур сечения, на участке длиной  $(l_c - l_n)$  – неполный круговой со свободной поверхностью. Способы описания напряженного состояния груза при этих двух разных видах сечения различны, поэтому удобно при рассмотрении напряженного состояния груза делить полное тело волочения на две части и рассматривать их напряженное состояние отдельно.

Наконец, рассмотрим характер взаимодействия груза с тяговой цепью. Поскольку можно рассчитать лишь максимально возможную силу трения груза о цепь, а фактически реализуемая ее часть не известна (полного скольжения груза вдоль цепи нет), как и направление сил трения, то необходимо задать на поверхности контакта груза с тяговой цепью граничные условия, исходя из кинематического характера связи между ними. При этом считаем, что коэффициент трения груза о цепь при транспортировании мелкокусковых, зернистых и порошкообразных грузов близок по величине к коэффициенту внутреннего трения груза, так как фактически частицы груза заполняют пустые полости в звеньях цепи и между ними, а трение остальной части груза происходит в значительной мере по этим частицам, неподвижным относительно цепи. Таким образом, можно заменить граничное условие на поверхности контакта груза с цепью кинематическим условием неподвижности в системе координат, связанной со скребками конвейера, частиц груза, находящихся на продольной оси цепи. В поперечном сечении груза этому условию соответствует неподвижная точка сыпучей среды в центре окружности поперечного сечения трубы конвейера (рис. 4).

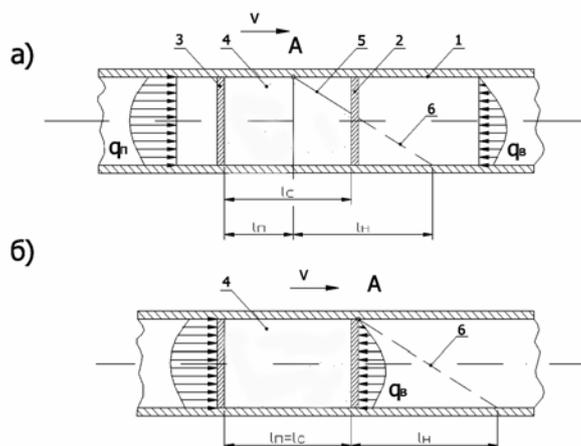


Рис. 3. Расчетная схема формирования давления груза на передний скребок и параметры полного тела волочения: 1 – труба конвейера; 2 – впереди идущий скребок; 3 – перемещающий скребок; 4 – сыпучая среда (тело волочения); 5 – свободная поверхность тела волочения; 6 – условное продолжение свободной поверхности тела волочения

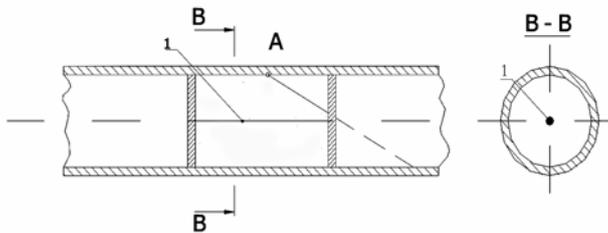


Рис. 4. Расчетная модель взаимодействия груза с тяговой цепью: 1 – неподвижная ось из частиц груза

Таким образом, нами сформулированы основные положения расчетной модели тела волочения в трубчатом скребковом конвейере. К сожалению они не позволяют решать систему из трех уравнений напряженного состояния груза (1), так как в

этих уравнениях 6 неизвестных функций координат  $z, r, \theta$ . Необходимо к уравнениям (1) добавить условия предельного состояния груза, которые можно получить лишь на основе качественного анализа напряженного состояния и применения каких-либо методов раскрытия статической неопределенности рассматриваемой задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Физматгиз, 1960. - 243 с.
2. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. – М.: Машиностроение, 1964. - 256 с.

#### Коротко об авторах

Галкин Владимир Иванович – профессор, доктор технических наук,  
Громов Сергей Викторович – аспирант,  
кафедра «Горная механика и транспорт», Московский государственный горный университет.

© Д.С. Кулагин, 2005

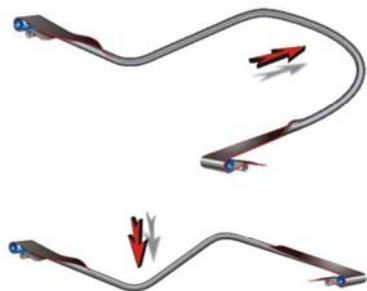
УДК 622.64

Д.С. Кулагин

### **ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО ТРУБЧАТОГО КОНВЕЙЕРА НА ДОПУСТИМЫЕ РАДИУСЫ ИЗГИБА ЕГО ТРАССЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Семинар № 15

**Л**



*Рис. 3. Трасса ленточного трубчатого конвейера с изгибами в горизонтальной и вертикальной плоскостях*

ленточный трубчатый конвейер (ЛТК) конструктивно близок к ленточному конвейеру традиционной конструкции, но имеет ряд отличий: лента имеет форму почти правильной окружности в поперечном сечении (трубообразную форму) (рис. 1); роlikоопора имеет форму шестиугольника и состоит из шести роликов (рис. 2), в которой с каждой стороны опорной панели расположены по три ролика. Это позволяет увеличить длину ролика, тем самым, создав контур, в котором исключено защемление ленты; кромки ленты соединены внахлестку и образуют герметичное

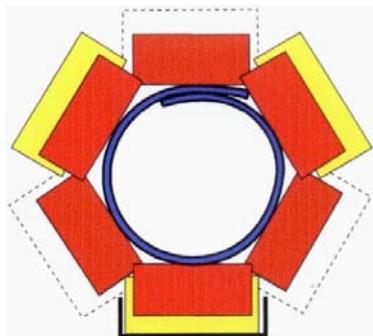


*Рис. 1. Трубообразная форма ленты ленточного трубчатого конвейера*

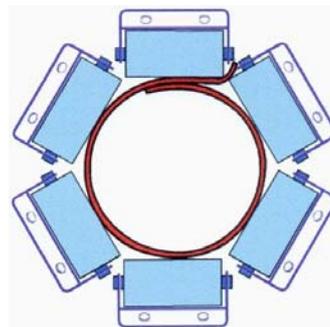
соединение.

Одним из достоинств ленточного трубчатого конвейера является возможность создания конструкций конвейеров, имеющих пространственные трассы с различными изгибами как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях (рис. 3). В настоящее время в информации по данному типу конвейеров, в основном зарубежной, встречающейся в различных источниках, не приводится никаких зависимостей допустимых радиусов изгиба трассы ленточного трубчатого конвейера от его параметров, поэтому обоснование данных радиусов в зависимости от конструктивных параметров конвейера является одной из первоочередных задач.

При обосновании допустимых радиусов изгиба трассы конвейера в горизонтальной плоскости одним из принятых критериев, при которых конвейер считался неработоспособным, являлось нарушение контакта ленты ЛТК с одним из роликов роlikоопоры (отрыв ленты при движении от ролика).



*Рис. 2. Роlikоопора ленточного трубчатого конвейера*



Лента при малых радиусах кривизны трассы и высоком натяжении может терять контакт с из роликов. Потеря контакта может нарушить устойчивое движение ленты конвейера, что недопустимо. Решение такого рода задачи аналитическими методами представляется крайне сложным, так как расчетная модель является нелинейной и содержит много переменных параметров, по-

этому были использованы метод конеч-

Рис. 5. Определение степени заполнения сечения ленты в зависимости от  $\varphi^\circ$

Рис. 6. Зависимость радиуса изгиба трассы ленточного трубчатого конвейера от натяжения ленты

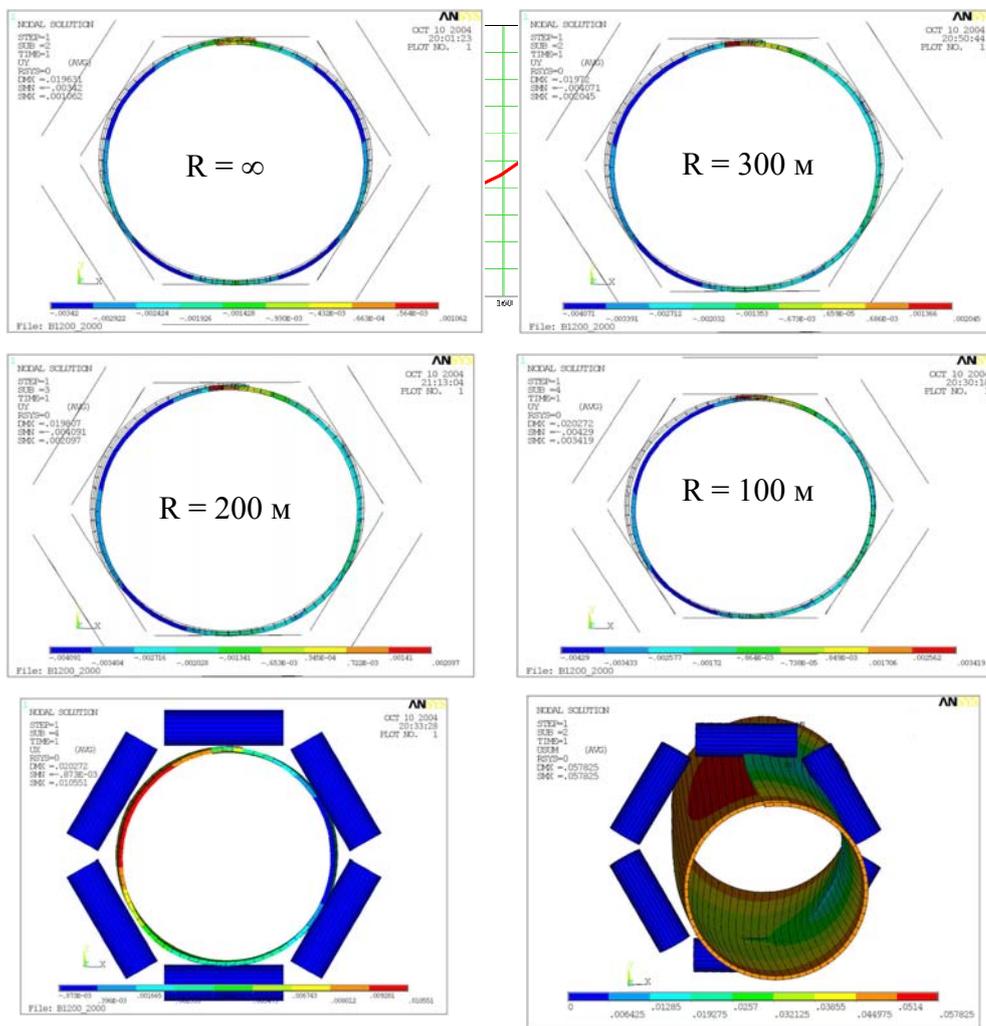
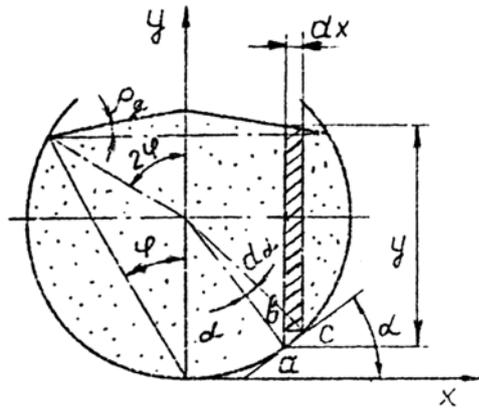


Рис. 4. Результат моделирования



В расчетной модели лента конвейера была принята как ортотропная оболочка. В расчетной модели приняты различные конструктивные параметры конвейера: ширина ленты ( $B$ ), натяжение ленты ( $S$ ), степень заполнения поперечного сечения ленты ( $\phi$ ), расчетный модуль упругости ленты ( $E_p$ ), расстояние между роlikоопорами ( $L_p$ ), плотность транспортируемого груза ( $\rho$ ).

На рис. 4 приведены результаты моделирования, которые позволяют проследить последовательность возникновения процесса отрыва ленты ленточного трубчатого

конвейера от ролика при различных значениях радиуса кривизны. Результаты получены для ленты шириной 1200 мм из пяти прокладок, натяжение 134 кН, прочностью 300 н/см, плотность груза 2000 кг/м<sup>3</sup>, степень заполнения поперечного сечения 30°.

Степень заполнения поперечного сечения ленты определялась схемой, используемой в диссертационной работе Гуцина В.Н. В расчетах использовались зависимости по определению активных и пассивных нагрузок на ленту от груза из той же работы.

На рис. 6 приведены графики зависимости радиуса изгиба трассы ленточного трубчатого конвейера от натяжения ленты ( $S$ ), полученные путем моделирования на ЭВМ в пакете ANSYS.

Расчетная модель позволяет оценить влияние практически любых параметров конвейера на радиус изгиба, а также определить допустимые радиусы изгиба и в вертикальной плоскости.

### Коротко об авторах

Кулагин Д.С. – аспирант, кафедра «Горная механика и транспорт», Московский государственный горный университет.

