

УДК 662. 749. 2. 002. 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ
УГЛЕРОДНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ
ПРОТАЛКИВАНИЯ В ПЕЧАХ ПОЛУКОКСОВАНИЯ
И КОКСОВАНИЯ

А.Н. Нестеров, М.А. Остапенко

Донецкий национальный технический университет

Вирішена задача моделювання силових навантажень при пересуванні вуглецевих сипких матеріалів у печах напівкоксування і коксування з урахуванням кута розкриття бокових стінок камер.

Задача моделирования силовых нагрузок при перемещении устройством для проталкивания углеродного сыпучего материала, находящегося по длине печи на различных стадиях термолитических превращений, разбивается на задачи перемещения углеродистого материала на отдельных участках. Предполагается, что в пределах каждого из этих участков физико-механические свойства материала одинаковы.

При этом расчет начинается с определения силовых нагрузок перемещения углеродного материала на последнем по направлению проталкивания участке. Усилие перемещения углеродного материала на i – ом участке печи принимается в качестве усилия сопротивления при моделировании силовых нагрузок на $(i-1)$ – ом участке. Такой подход позволяет при известных физико-механических свойствах угольной шихты или бурого угля проверить адекватность модели на холодной экспериментальной установке.

Схема к моделированию силовых нагрузок на участках, где происходит деформация материала с образованием контакта со стенками печи, показана на рисунке 1.

Начальная длина расчетного участка – L_0 .

Материал, находящийся на расчетном участке, испытывает силовое воздействие F со стороны материала, находящегося на предыдущем участке.

Под воздействием усилия F осуществляется уплотнение материала. Уплотненная масса, имеющая длину L , перемещается в зону последующего участка, вызывая уплотнение и перемещение находящегося там материала.

Усилие R является силой сопротивления при перемещении уплотненного материала расчетного участка. Оно равно силе, необходимой для перемещения материала на всех последующих участках.

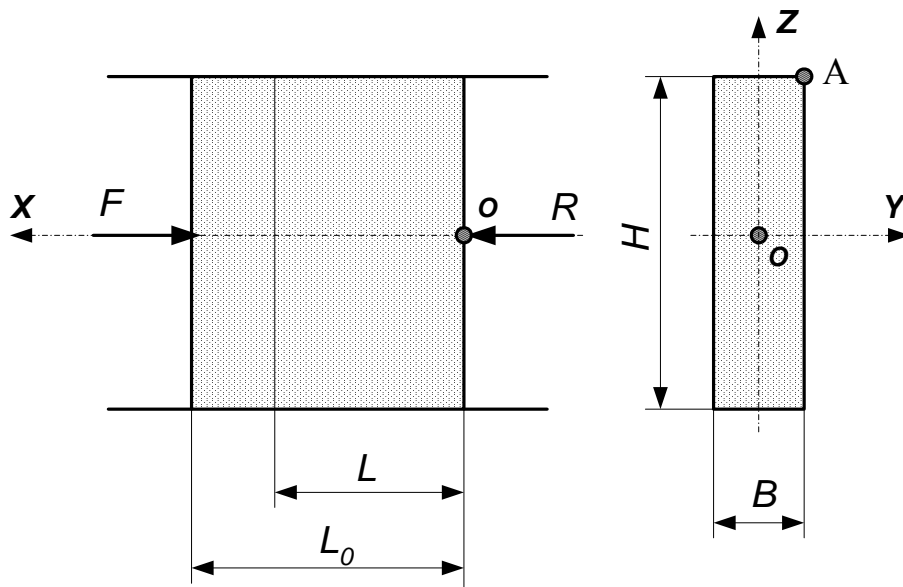


Рис. 1. Схема к моделированию силовых нагрузок на участках деформации материала.

При моделировании силовых нагрузок приняты следующие допущения:

1. Принимается гипотеза сплошности углеродного материала.

Принятие этой гипотезы накладывает определенные ограничения на размеры исследуемого объема и средний размер частиц материала. Эти ограничения учитывались нами при разработке экспериментальной установки. Суть их заключается в том, что при проведении исследований, связанных с уплотнением сыпучих и зернистых материалов, минимальный размер исследуемого объема не должен быть меньше, чем $30d_{\text{ср}}$, где $d_{\text{ср}}$ – средний размер частиц. Выполнение этого условия позволяет свести к минимуму влияние дискретности.

2. Не учитываются массовые силы деформированной части материала. Правомерность этого допущения подтверждается расчетом, который показывает, что дополнительное сопротивление, вызванное действием массовых сил, не превышает 1% от общего усилия проталкивания материала. Введение этого допущения позволяет использовать результаты исследований при проектировании горизонтальных и вертикальных печей непрерывного слоевого коксования.

3. Принимается предположение об изотропности углеродного материала, которое используется в дальнейшем при установлении связи между напряжениями и деформациями.

4. Моделирование силовых нагрузок проводится в квазистатической постановке, т.е. без учета сил инерции, величина которых незначительна при небольшой скорости перемещения проталкивающего устройства.

5. Наличие воздуха в пространстве между частицами углеродного материала не оказывает существенного влияния на процесс его уплотнения. Это допущение также правомерно при малых скоростях уплотнения и перемещения.

6. Деформации стенок печи малы, что позволяет сделать предположение об отсутствии перемещений частиц уплотняемого углеродного материала в направлениях перпендикулярных направлению движения головки устройства для проталкивания.

7. В рассматриваемом диапазоне напряжений величина комплексного коэффициента kf постоянна, где k – коэффициент бокового давления, а f – коэффициент трения сыпучего или зернистого материала о стенки загрузочной камеры.

8. Принимается принцип линейной деформируемости углеродного материала. Этот принцип заключается в том, что при небольших изменениях напряжений, зависимость между напряжениями и относительными деформациями принимается линейной.

Задача о влиянии угла раскрытия стенок камеры решалась нами на первом этапе исследований с принятием гипотезы плоских сечений, суть которой заключается в предположении, что плоские сечения перпендикулярные оси печи не искривляются, а нормальные напряжения одинаковы во всех точках плоского сечения (Рис. 2).

Условие равновесия бесконечно малого элемента уплотненного углеродного материала в проекции на ось OX имеет вид

$$\sum F_x = \sigma_x \cdot S_x - (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (S_x - dS_x) + dF_{mp} = 0,$$

где σ_x – среднее нормальное напряжение, действующее на расстоянии x от границы расчетного и последующего участков;

$d\sigma_x$ – приращение напряжения;

S_x – площадь поперечного сечения камеры на расстоянии x от границы расчетного и последующего участков;

dS_x – приращение площади;

dF_{mp} – суммарная сила трения бесконечно малого элемента углеродного материала о свод, под и боковые стенки камеры.

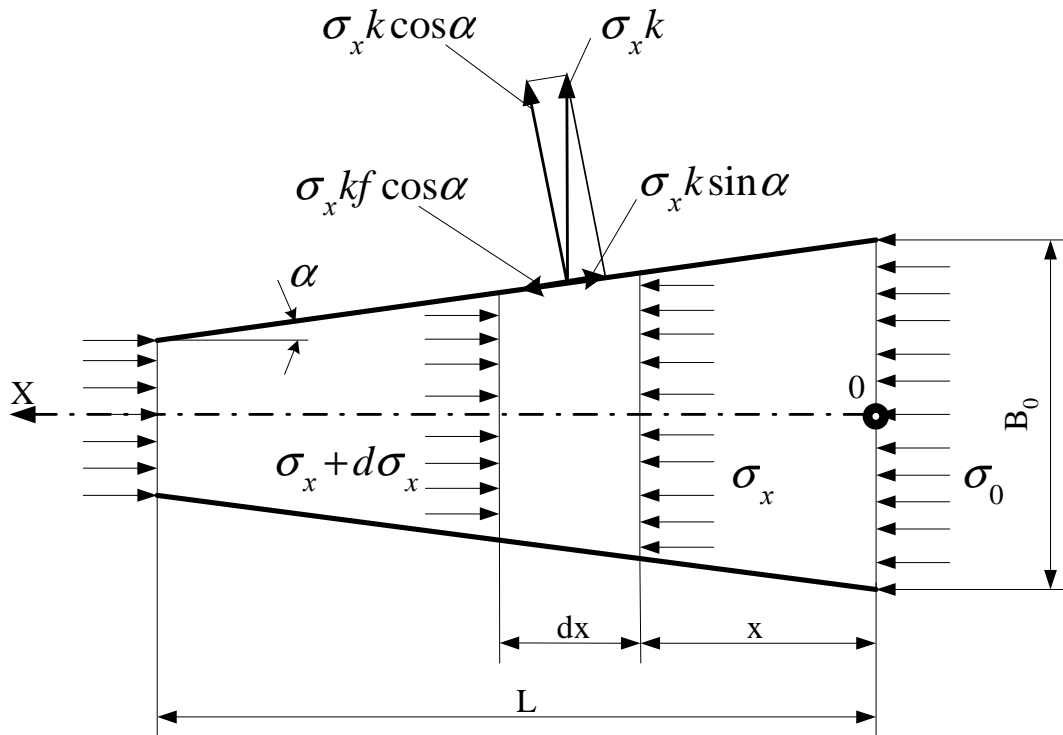


Рис. 2. К моделированию силовых нагрузок с учетом угла раскрытия стенок камеры

$$dF_{mp} - S_x \cdot d\sigma_x + \sigma_x \cdot dS_x + dS_x \cdot d\sigma_x = 0;$$

Так как выражение $dS_x \cdot d\sigma_x$ является бесконечно малой величиной второго порядка, то ею можно пренебречь и тогда условие равновесия принимает вид:

$$dF_{mp} - S_x \cdot d\sigma_x + \sigma_x \cdot dS_x = 0. \quad (1)$$

$$dF_{mp} = dF_{mp}^1 + dF_{mp}^{11}, \quad (2)$$

где dF_{mp}^1 – сила трения бесконечно малого элемента о боковые стенки камеры;

dF_{mp}^{11} – сила трения бесконечно малого элемента о свод и под камеры.

Легко показать, что

$$dF_{mp}^1 = \left[2(\sigma_x k f \cos \alpha - \sigma_x k \sin \alpha) H \frac{dx}{\cos \alpha} \right] \cos \alpha,$$

где k – коэффициент бокового давления углеродного материала;

f – коэффициент внешнего трения углеродного материала;

α – угол раскрытия стенок камеры;

H – высота рабочей камеры.

После упрощения находим

$$dF_{mp}^1 = -2H \cdot k \cdot \sigma_x \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \cdot dx. \quad (3)$$

Сила трения бесконечно малого элемента о свод и под камеры определяется по формуле:

$$dF_{mp}^{11} = 2\sigma_x \cdot k \cdot f \cdot B_x \cdot dx, \quad (4)$$

где B_x – ширина камеры на расстоянии x от границы расчетного и последующего участков.

Ширина рабочей камеры на расстоянии x от границы расчетного и последующего участков определяется по формуле:

$$B_x = B_0 - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где B_0 – ширина камеры на границе расчетного и последующего участков.

Площадь поперечного сечения камеры на расстоянии x от границы расчетного и последующего участков определяется по формуле:

$$S_x = (B_0 - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot H; \quad (6)$$

Приращение площади S_x определяется по формуле:

$$dS_x = -2H \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot dx, \quad (7)$$

После упрощений приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} = -\frac{2 \cdot (H \cdot \operatorname{tg} \alpha - B_0 \cdot f \cdot k + H \cdot k \cdot \sin \alpha - H \cdot f \cdot k \cdot \cos \alpha + 2f \cdot k \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha)}{H \cdot (B_0 - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha)} dx. \quad (8)$$

После интегрирования приходим к следующему выражению

$$\ln \sigma_x - \ln C = \frac{\ln(B_0 - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot (\operatorname{tg} \alpha + k \cdot \sin \alpha - f \cdot k \cdot \cos \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{2f \cdot k \cdot x}{H}, \quad (9)$$

где $\ln C$ – константа интегрирования.

Граничные условия для определения константы $\ln C$:

При $x=0$, $\sigma_x = \sigma_0$.

Решение дифференциального уравнения (8) принимает вид:

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot e^{\frac{2f \cdot k \cdot x}{H}} \cdot \left(\frac{B_0 - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{B_0} \right)^{\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha + k \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha} \right)}. \quad (10)$$

Учитывая, что при $x=L$, $\sigma_x = \sigma_T$ приходим к формуле для определения среднего нормального напряжения на поверхности головки устройства для проталкивания:

$$\sigma_T = \sigma_0 \cdot e^{\frac{2f \cdot k \cdot L}{H}} \cdot \left(\frac{B_0 - 2L \cdot \operatorname{tg} \alpha}{B_0} \right)^{\left(\frac{\operatorname{tg} \alpha + k \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha} \right)}. \quad (11)$$

При $\alpha = 0$ приходим к известной формуле

$$\operatorname{Lim}_{\alpha \rightarrow 0} \sigma_x = \sigma_0 e^{\frac{2f \cdot k \cdot x \cdot (B_0 + H)}{B_0 \cdot H}}. \quad (12)$$

Расчет по формуле (10) распределения напряжений σ_x по длине уплотненной массы углеродного материала при различных углах расширения камеры выполнен с использованием программы Mathcad при следующих исходных данных: $\sigma_0 = 1,0 \text{ МПа}$; $H = 0,11 \text{ м}$; $B_0 = 0,12 \text{ м}$; $L = 0,136 \text{ м}$; $f = 0,4$; $k = 0,44$; $\alpha = 0.2 \dots 1.6^\circ$; $x = 0 \dots 0,136 \text{ м}$.

Результаты расчета представлены на рисунке 3.

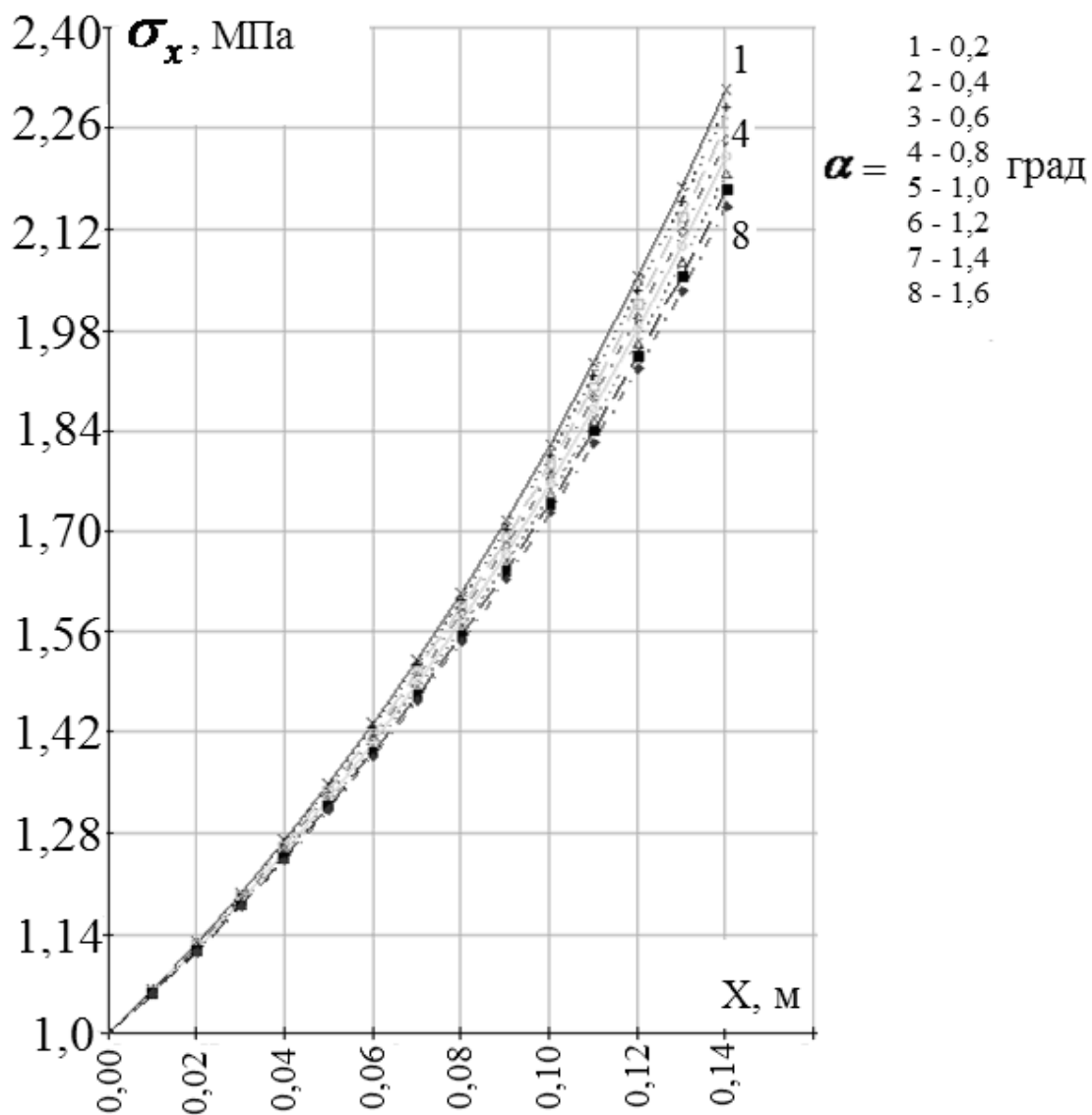


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x по длине уплотненной массы углеродного материала при различных углах расширения камеры