

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

**НАУКА И МОЛОДЕЖЬ:  
ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**ВЫПУСК 27**

*Труды Всероссийской научной конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
16 – 17 мая 2023 г.*

**ЧАСТЬ II**

Под общей редакцией профессора С.В. Коновалова

**Новокузнецк  
2023**

ББК 74.48.288  
Н 340

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор Коновалов С.В.,  
д-р техн. наук, профессор Фрянов В.Н.,  
канд. техн. наук, доцент Чаплыгин В.В.,  
канд. техн. наук, доцент Риб С.В.,  
д-р техн. наук, профессор Кулаков С.М.,  
канд. техн. наук, доцент Темлянцева Е.Н.

Н 340

Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16–17 мая 2023 г. Выпуск 27. Часть II. Технические науки / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. С. В. Коновалова – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 364 с. : ил.

ISSN 2500-3364

Представлены труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по результатам научно-исследовательских работ. Вторая часть сборника посвящена актуальным вопросам в области перспективных технологий разработки месторождений полезных ископаемых; информационных технологий и систем автоматизации управления; экологии, безопасности, рационального использования природных ресурсов.

Материалы сборника представляют интерес для научных и научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

ISSN 2500-3364

© Сибирский государственный  
индустриальный университет, 2023

## О РАСЧЕТЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩЕГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

**Гельгенберг И.О., Прошунин Ю.Е.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, e-mail: domikParatoz@gmail.com*

В данной статье предложен метод уточнения известной формулы Янсена путем учета зависимости объемной плотности реального углесодержащего сыпучего материала от величины уплотняющего давления.

Ключевые слова: формула Янсена, углесодержащий сыпучий материал, изменение объемной плотности, уплотняющее давление, уравнение Риккати, вертикальные напряжения.

В 1895 г. была опубликована работа Янсена [1], ставшая важной вехой в развитии теории давления сыпучих материалов (СМ) на стенки цилиндрических хранилищ. Автор получил выражение, характеризующее распределение напряжений в бункерах, положенное в основу используемого до настоящего времени метода расчета и основанную на следующих основных предположениях:

- вертикальное напряжение на любой глубине от поверхности СМ равномерно распределено по площади горизонтального сечения ( $d\sigma_y/dx=0$ );
- объемная плотность СМ не зависит от величины уплотняющего давления ( $d\rho/d\sigma_y=0$ );
- коэффициент бокового давления, то есть отношение горизонтального напряжения к вертикальному, в любой точке сыпучего тела постоянен ( $\xi = \sigma_x/\sigma_y = \text{const}$ );
- коэффициент внешнего трения – величина неизменная ( $f_w = \text{const}$ );
- глубина емкости не ограничена, то есть не учитывается влияние жесткого днища хранилища.

С учетом вышеизложенного, Янсенем рассмотрено равновесие жесткого слоя элементарной толщины  $dy$  диаметром  $D$ , лежащего на расстоянии  $y$  от поверхности СМ (рис. 1).

Уравнение его равновесия записывается в виде:

$$\rho g \frac{\pi D^2}{4} dy + \frac{\pi D^2}{4} \sigma_y - \frac{\pi D^2}{4} (\sigma_y + d\sigma_y) - \xi f_w \pi \sigma_y dy = 0. \quad (1)$$

После элементарных преобразований данное выражение переходит в обыкновенное линейное дифференциальное уравнение первого порядка (2).

$$\frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{4\xi f_w}{D} \sigma_y = \rho g. \quad (2)$$

Используя условие отсутствия напряжений на свободной поверхности СМ ( $\sigma_y|_{y=0} = 0$ ), Янсен получил следующее соотношение:

$$\sigma_y = \frac{\rho g D}{4\xi f_w} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4\xi f_w}{D} y\right) \right]. \quad (3)$$

В настоящей публикации для определения величины коэффициента бокового давления ( $\xi_a$ ) использовано отношение главных напряжений идеально сыпучего материала, находящегося в активном предельном напряженном состоянии ( $\sigma_y > \sigma_x$ ) [2]:

$$\xi_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (4)$$

Анализ выражения (3) показывает, что с увеличением глубины  $y$  приращение давления уменьшается, а его величина стремится к пределу  $\frac{\rho g D}{4\xi f_w}$ .

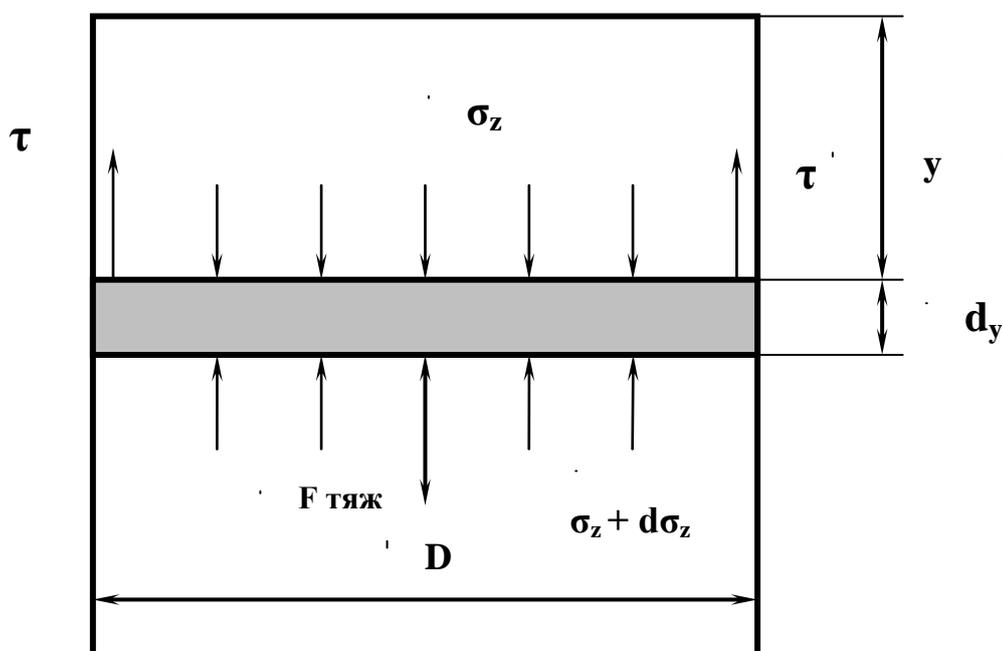


Рисунок 1 – Распределение сил, действующих на слой СМ элементарной толщины.

Формула Янсена получила повсеместное распространение, несмотря на ряд исследований, где в промышленных условиях было отмечено существенное превышение расчетных значений давления, и широко применялась вплоть до 1930-х годов. В это время качественный скачок в технике и технологии строительства хранилищ СМ значительной емкости привел к ряду серьезных аварий [2, 3], показавших, что формула Янсена, полученная при рассмотрении статического равновесия элементарного объема, не может быть привлечена для объяснения сложных динамических явлений, возникающих при выпуске СМ, даже при введении различного рода эмпирических коэффициентов [2-4].

Однако, до настоящего времени выражение (3) широко используется исследователями для расчета полей напряжений в неподвижных или медленно деформирующихся массивах СМ, о чем свидетельствуют различные попытки уточнения формулы Янсена, направленные, как правило, на уточнение одного из пяти (в основном первого-третьего) лежащих в основе ее вывода предположений [2-5].

В настоящей работе показано, что принятое условие несжимаемости СМ не позволяет использовать полученные результаты там, где нужна значительная точность, и не дает возможности оценить изменение плотности по высоте массива значительного объема, где вещество уплотняется под действием давления вышерасположенных слоев материала. В процессах переработки углей, например, возрастание плотности угольного концентрата по направлению к нижним горизонтам слоя СМ показано многими исследованиями [6].

В работе [6] показано, что зависимость уплотняющего давления от уплотняющего давления целесообразно представить в виде:

$$\rho g = A\sigma_y^2 + B\sigma_y + M. \quad (5)$$

Разница между расчетными и экспериментальными значениями при фиксированном значении влажности не превышает 1-2 кг, а коэффициенты А, В, М в зависимости от целей исследования являются постоянными величинами либо функциями технологических параметров. Рассмотрим, насколько значимо влияние сжимаемости углесодержащих материалов на распределение напряжений в их массиве.

После подстановки (5) в исходное дифференциальное выражение Янсена (2) получим уравнение Риккати:

$$\frac{d\sigma_y}{dy} = A\sigma_y^2 + \left( B - \frac{4f_w \xi}{D} \right) \sigma_y + M. \quad (6)$$

Интегрирование его при начальном условии  $G_y|_{y=0} = 0$  дает:

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \frac{1 + \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{2Fy}}{1 - \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{2Fy}} - \frac{N}{2A'} \quad (7)$$

где N и F определяются следующими выражениями:

$$N = B - \frac{4f_w \xi}{D}; \quad (8)$$

$$F = \left( \frac{N^2}{4} - MA \right)^{0.5}. \quad (9)$$

С увеличением высоты слоя сыпучего материала величина давления стремится к пределу:

$$\sigma_y = -A^{-1} \left\{ \left[ \left( \frac{BD - 4f_w \xi}{2D} \right)^2 - MA \right]^{0.5} + \frac{BD - 4f_w \xi}{2D} \right\}. \quad (10)$$

В общем случае его значение несколько выше, чем значение предела, полученного по формуле Янсена. При этом разница возрастает с увеличением сжимаемости исследуемого вещества.

Значение горизонтального напряжения на любой глубине массива можно определить из выражения  $\sigma_x = \xi \sigma_y$ . Средняя по высоте слоя материала величина вертикального и горизонтального напряжений может быть найдена из выражения (11):

$$\sigma_{yc} = \frac{1}{y_k - y_0} \int_{y_0}^{y_k} \sigma_y(y) = A^{-1} \left[ \left( F - \frac{N}{2} \right) + \frac{1}{y_k - y_0} \ln \frac{1 + \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{\alpha y_0}}{1 - \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{\alpha y_k}} \right], \quad (11)$$

где  $\sigma_{xc} = \xi \sigma_{yc}$ .

Здесь  $y_k$  и  $y_0$  - соответственно большая и меньшая вертикальные координаты рассматриваемого участка.

Интегрирование уравнения Риккати при наличии дополнительной нагрузки  $\sigma_0$  на массива СМ, то есть начальном условии  $\sigma_y|_{y=0} = \sigma_0$  позволяет получить следующее выражение:

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \frac{1 + \frac{2AG_0 + N - 2F}{2AG_0 + N + 2F} e^{2Fy}}{1 + \frac{2AG_0 + N - 2F}{2AG_0 + N + 2F} e^{2Fy}} - \frac{N}{2A}, \quad (12)$$

где  $N$  и  $F$  определяются следующими выражениями:

$$N = B - \frac{4f_w \xi}{D}; \quad (13)$$

$$F = \left( \frac{N^2}{4} - MA \right)^{0.5}. \quad (14)$$

Полученные соотношения могут быть использованы для распределения полей напряжений и объемных плотностей в неподвижном массиве углесоудержающего материала постоянного сечения.

#### Библиографический список

1. Janssen H.A. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen / H.A. Janssen // Z. Ver. Dt. Ing. - 1895. - V. 39. - S. 1045 - 1049.
2. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел / Г.К. Клейн. - М.: Стройиздат, 1977. - 256 с.
3. Граник В.Т. О динамике сыпучего потока в силосной оболочке при переменном коэффициенте сухого трения / В.Т. Граник // Строительная механика и расчет сооружений. - 1985. - №5. - С. 39 - 43.

4. Лукьянов П.И. Аппараты с движущимся зернистым слоем / П.И. Лукьянов. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с.

5. Клишин С. В., Ревуженко А. Ф. Исследование задачи Янсена методом дискретных элементов в трехмерной постановке / С.В. Клишин, А.Ф. Ревуженко // ФТПРПИ. - 2014. - № 3. - С. 10–16.

6. Прошунин Ю.Е. О совершенствовании математической модели выпуска сыпучих материалов / Ю.Е. Прошунин // Известия ТПУ. – 2007. – Том 310. – №3. – С. 44 – 49.

УДК 622.7

## О ТЕОРЕТИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Гельгенберг И.О., Прошунин Ю.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, e-mail: domikParatoz@gmail.com*

Выполнено сопоставление методов расчета полей напряжений и объемных плотностей углесодержащих сыпучих материалов в цилиндрических хранилищах при помощи классической формулы Янсена и формулы Янсена, модернизированной учетом нелинейной сжимаемости материала в зависимости от уплотняющего давления.

Ключевые слова: углесодержащий сыпучий материал, цилиндрические хранилища, поля напряжений и объемных плотностей, расчет, экспериментальные результаты, соответствие.

В настоящей статье выполнено сопоставление методов расчета полей напряжений и объемных плотностей углесодержащих сыпучих материалов (СМ) в цилиндрических хранилищах при помощи классической формулы Янсена (1) и формулы Янсена, модернизированной учетом нелинейной сжимаемости материала в зависимости от уплотняющего давления (2):

$$\sigma_y = \frac{\rho g D}{4\xi f_w} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{4\xi f_w}{D} y\right) \right]. \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \frac{1 + \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{2Fy}}{1 - \frac{N - 2F}{N + 2F} e^{2Fy}} - \frac{N}{2A'} \quad (2)$$

где N и F определяются следующими выражениями:

$$N = B - \frac{4f_w \xi}{D}; \quad (3)$$

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>I ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ .....</b>	<b>2</b>
О РАСЧЕТЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ <i>Гельгенберг И.О., Прошунин Ю.Е.</i> .....	3
О РАСЧЕТЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ УГЛЕСОДЕРЖАЩЕГО СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА <i>Гельгенберг И.О., Прошунин Ю.Е.</i> .....	7
О ТЕОРЕТИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ <i>Гельгенберг И.О., Прошунин Ю.Е.</i> .....	11
РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА СОВРЕМЕННОЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ В УСЛОВИЯХ КУЗБАССА, НА ПРИМЕРЕ ШАХТЫ «ЕРУНАКОВСКАЯ-VIII» <i>Хабибулова А.Р., Коряга М.Г.</i> .....	15
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАБЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОРОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ ОТРАБОТКИ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ» <i>Шинтев И.С., Володина А.В.</i> .....	20
РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ДЕГАЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОРАЗРЫВА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ ШАХТ КУЗБАССА <i>Шинтев И.С., Коряга М.Г.</i> .....	23
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ ВДОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОРОГ <i>Альвинский Я.А., Григорьев А.А., Мананников С.Д., Никитина О.Ю.</i> .....	28
АППАРАТ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ РЕЗКИ МАССИВА ПОРОД И РАСШИРЕНИЯ СКВАЖИН <i>Альвинский Я.А., Григорьев А.А., Мананников С.Д., Никитина А.М.</i> .....	32
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ПАДАЮЩЕГО ГРУЗА <i>Апёнкин Д.Е., Михайлов Д.С., Волошин В.А.</i> .....	36
РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ВЛИЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ И КОРРЕКТИРОВКА ПАСПОРТА БВР НА РАЗРЕЗЕ «МЕЖДУРЕЧЬЕ» <i>Апёнкин Д.Е., Михайлов Д.С., Волошин В.А.</i> .....	40
ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ СИБГИУ НА РАЗРЕЗЕ АО «МЕЖДУРЕЧЬЕ» «НОВАЯ ГОРНАЯ УПРАВЛЯЮЩАЯ КОМПАНИЯ» <i>Апёнкин Д.Е., Михайлов Д.С., Волошин В.А.</i> .....	44
ОПТИМИЗАЦИЯ МОНТАЖНО-ДЕМОНТАЖНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «СИБИРГИНСКАЯ» <i>Елкина Д.И., Никитина А.М.</i> .....	47

Научное издание

# **НАУКА И МОЛОДЕЖЬ: ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Выпуск 27**

*Труды Всероссийской научной конференции студентов,  
аспирантов и молодых ученых*

**Часть II**

Под общей редакцией  
Технический редактор  
Компьютерная верстка

С.В. Коновалова  
Г.А. Морина  
Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 25.04.2023 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 21,0 Уч.-изд. л. 23,40 Тираж 300 экз. Заказ № 92

Сибирский государственный индустриальный университет  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Издательский центр СибГИУ