

Бункеры для хранения технологической щепы и древесных отходов широко применяются при химической переработки биомассы дерева [1,2]. Исследования по статике и динамике сыпучих материалов начались очень давно. Одной из основополагающих работ в области статике сыпучего материала является работа Янсена [3], которая в какой-то степени объяснила экспериментальные исследования. Эта работа была впервые опубликована в 1895 году. Величина осевого давления сыпучего материала определенная по формуле Янсена, (1) где ρ_0 плотность сыпучего материала; f коэффициент трения сыпучего материала о стенки сосуда; F площадь горизонтального сечения бункера, m^2 ; L периметр сечения бункера; K коэффициент бокового давления, определяющий отношение горизонтального давления P_{rad} на вертикальную стенку к вертикальному (осевому) давлению P_{os} на горизонтальную площадку; H – высота слоя засыпки сыпучего материала в бункере. Как видно, кроме плотности ρ , сюда не входят физико-механические свойства самого сыпучего материала и время его хранения в бункере. Несмотря на это, теория изложенная Янсенем, получила дальнейшее развитие в работах многих зарубежных и отечественных ученых. Формула для определения коэффициента бокового давления K была впервые выведена Кененом [1]: (2) где φ – угол внутреннего трения. Радиальное давление для круглого бункера равно: (3) Из формулы (1) видно, что давление на днище и стенки сосуда от сыпучего материала не возрастает беспредельно с увеличением высоты засыпки H , а стремится асимптотически к максимуму при $H = \infty$. Формулы радиального и осевого давления (1, 3) могут быть поэтому записаны так: (4), (5) где гидравлический радиус поперечного сечения бункера. Как показал опыт эксплуатации бункеров для сыпучих материалов, формулы (4) и (5) для многих материалов дают заниженные значения боковых и нормальных напряжений, так как при выводе формул не учитывались явления динамики, связанные с истечением материала и неравномерность распределения давления по периметру бункера. Действительные нагрузки, превышающие теоретические по формуле Янсена, объясняются также явлениями зависания материала на стенках сосуда в результате налипания этих частиц на них. Кроме того, по мере возрастания высоты засыпки, нижние слои материала уплотняются под действием собственного веса, что существенно влияет на характер распределения нагрузок по высоте. Клейн Г.К. исследовал давление сыпучей среды на стенки сосуда и предложил формулу для расчета давлений на основе формулы Янсена с учетом увеличения объемного веса насыпного материала с возрастанием давления и показал, что расчетные нагрузки в зависимости от ряда условий могут быть в два раза больше, чем полученные по формуле Янсена-Кенена. Формула Г.К. Клейна [1] с учетом увеличения плотности при увеличении высоты засыпки имеет следующий вид: (6) при , где E – модуль упругости; μ – коэффициент поперечной деформации; B – условный коэффициент, зависящий от μ и E . Зенков Р.Л. на основании формулы

Янсена (1) выводит следующую обобщенную формулу [4] для расчета давлений, вводя в нее высоту вертикальной свободно стоящей стенки H_0 ; (7) (8) при , где τ_0 – начальное сопротивление сдвигу; α – угол внутреннего трения; E – коэффициент зависания; K – коэффициент бокового давления; H – высота слоя засыпки сыпучих материалов; f – коэффициент внешнего трения. Для связанных сыпучих материалов выражения (7) и (8) имеют следующий вид: ; (9) . (10)

Формулы для расчета давлений Зенкова и Клейна не получили широкого применения. Многие другие ученые пытались скорректировать формулу Янсена, но их работы также не получили дальнейшего распространения. Известно, что насыпное сырье при длительном хранении в бункере уплотняется под действием силы тяжести и микросейсмических воздействиях. Для уточнения формулы Янсена проведены исследования по изменению плотности насыпного материала в бункере на примере технологической щепы из осины [5,6]. Данные исследования помогли определить плотность технологической щепы в зависимости от времени хранения в бункере и высоты столба насыпного материала. Коэффициент уплотнения технологической щепы варьируется в пределах от 1,2 до 1,4 в зависимости от породы щепы, влажности и других факторов. Более точное определение плотности технологической щепы при хранении в бункере позволяет приблизить расчетное давление щепы на стенки бункера по формуле Янсена к значениям давления полученным экспериментально. На основе результатов многофакторного эксперимента получена зависимость изменения плотности технологической щепы для бункеров аккумуляторов от времени хранения и высоты столба насыпного материала влажностью 39%. По результатам исследования выведена зависимость изменения плотности технологической щепы от времени хранения и высоты столба насыпного материала в бункере при заданной влажности. Зависимость выглядит следующим образом , (11) где $\rho_0 = 287 \text{ кг/м}^3$ – начальная плотность технологической щепы из осины; k – коэффициент, зависящий от условий хранения; H_0 – относительная высота заполнения бункера; , где H_i высота i -го слоя от уровня поверхности щепы, м; ΔH высота слоя от уровня поверхности щепы равная 1 м. Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,944$. Теоретическая зависимость изменения коэффициента K от времени хранения от 5 до 72 часов будет выглядеть следующим образом , (12) где t_0 – относительное время хранения технологической щепы в бункере. , где t_i – i -ое время хранения сырья в бункере, час; Δt – время хранения сырья в бункере равное 1 часу. Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0,98$. Общее уравнение изменения плотности от времени хранения щепы в бункере от 5 часов и более имеет вид: $\rho = \rho_0 + (29,35 + 1,14 \ln t_0) \ln H_0$ (13)

Уплотнение технологической щепы зависит от высоты столба насыпного материала в бункере, времени хранения и других факторов. Точный учет влияния всех факторов на изменение плотности технологической щепы в

бункере затруднителен. В известных методиках давление технологической щепы на стенки и днище бункеров рассчитывают без учета изменений плотности при хранении. Такой подход к расчету значительно снижает точность определения давления сырья на днище и стенки бункера. В формулу (1) вместо значения ρ_0 подставим значение плотности полученной по формуле (13). С учетом корректировки формула (1) примет следующий вид . (14) Расчетное увеличение давления по формуле (14) по сравнению с формулой Янсена (1) достигает от 7 до 25% при времени хранения 24 ч. Формула (14) позволяет более точно рассчитывать параметры конструкций бункеров, его разгрузочных устройств и других технологических механизмов.