

біомаси в “активному” шарі; $-\frac{\partial(Y\rho^*)}{\partial t}$ – градієнт швидкості росту біомаси в “пасивному” шарі.

Рівняння (1) слід розглядати як рівняння постійності (балансу) “активної” біомаси, що математично описує механізм природної стаціонарності технологічного процесу в спорудах біологічної очистки стічних вод біоконтакторного типу.

Базовим рівнянням для описання ходу технологічного процесу в спорудах біологічної очистки, як правило, є рівняння матеріального балансу, наприклад, рівняння

$$Y \frac{dL}{dt} = Q(L_{en} - L_{ex}) - R, \quad (2)$$

запропоноване членом-кореспондентом НАН України Олійником О.Я. У ньому L_{en}, L_{ex} – відповідно початкова й кінцева концентрації забруднень у стічній воді, гБПК/м³; Q – витрата стічної води, м³/г; R – швидкість реакції.

З урахуванням сказаного для споруд біоконтакторного типу рівняння (2) набуває вигляду

$$QdL - R = \text{const}. \quad (3)$$

Вибір типу розрахункових залежностей, що оцінюють швидкість реакції (технологічного процесу), залежить від прийнятої моделі-аналога. Наприклад, для побутових та близьких до них за складом стічних вод можна використати відому модель Моно.

Отримано 12.05.2000

УДК 624.074.7

Г.А.МОЛОДЧЕНКО, канд. техн. наук

Харьковская государственная академия городского хозяйства

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТЕЧЕНИЯ СЫПУЧЕГО И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА СТЕНЫ СИЛОСОВ

Предложена физическая модель истечения сыпучего материала из цилиндрической емкости, выполнен анализ стадии неустановившегося движения, определено положение наиболее опасного участка по высоте емкости с максимальными давлениями.

В практике исследований нагрузок на стены силосов, как правило, учитывается форма сыпучего материала при выгрузке. Из установленной по принятой терминологии рассматривают три формы истечения: 1 – воронкообразную; 2 – форму истечения столбом; 3 – сме-

шанную. Наибольшие давления сыпучего зафиксированы при второй форме истечения, ее мы и рассмотрим далее как наиболее неблагоприятную.

Существование второй формы истечения определяется большим числом конструктивных параметров емкости и технологических факторов, включающих особенности заполнения, выдержки, разгрузки или проточного режима и др. Одним из главных параметров конструктивного решения емкости является соотношение ее высоты H к диаметру D .

1. Возьмем физическую модель процесса истечения и формирования давления на стенки емкости. Рассмотрим три последовательно проходящие стадии выпуска в процессе полной выгрузки сыпучего материала из емкости.

На первой стадии выгрузки сыпучего над центрально расположенным выпускным отверстием образуется зона разуплотнения (дилатансии), представляющая собой форму эллипсоида вращения с расположением длинной его оси по вертикали. С возрастанием времени (объема) выпуска эллипсоид увеличивается в размерах, представляя собой последовательно фигуры 1, 2 и 3, показанные на рис.1.а. В пределах объема зоны сыпучее приходит в движение, превращаясь в квазижидкое состояние. Происходит трансформация давлений и их заметное снижение по сравнению со статическим состоянием. Движение сыпучего в пределах зоны разуплотнения осуществляется за счет дилатансии, поэтому за пределами зоны движение отсутствует.

Первая стадия характеризуется неустановившимся движением и сопровождается трансформацией вертикальных давлений путем снижения их в зоне разуплотнения и повышения за ее пределами в кольцевой области, достигая предельных значений.

Достижение предельного состояния в кольцевой области высотой dz на глубине z характеризует наступление второй стадии истечения (рис.1.б). Сыпучий материал здесь также переходит в квазижидкое состояние, однако в отличие от зоны разуплотнения горизонтальные давления увеличиваются и сыпучее от пристенных участков начинает двигаться в горизонтальном направлении, попадая непосредственно в зону разуплотнения с меньшим давлением, а затем потоком истечения вовлекается в движение по направлению к выпускному отверстию.

Движение сыпучего на второй стадии имеет установившийся характер вплоть до снижения уровня засыпки до критической отметки, после чего наступает третья стадия движения. При проточном режиме

работы емкости (выгрузка с одновременной разгрузкой) вторая стадия будет иметь место на всем протяжении его осуществления.

На третьей стадии выпуска (рис.1,в) происходит смешанное движение сыпучего столбом и воронкой с последующим переходом к воронкообразному истечению. Давления сыпучего на стенку существенно снижаются, процесс истечения приближается к завершению в описанном режиме.

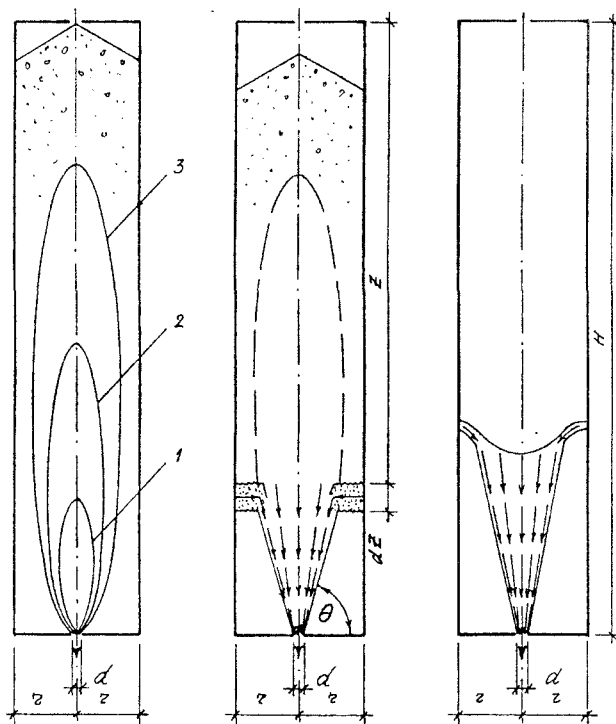


Рис.1 — Последовательность стадий выгрузки:
а, б, в — соответственно первая, вторая и третья стадии

На фото (рис.2) представлены схемы движения закрашенного в вертикальном направлении песка на диаметральной плоскости емкости через равные промежутки времени выгрузки. Уже через первые 15 с выгрузки наблюдается тенденция смещения сыпучего в нижней зоне (рис.2,а). При последующем выпуске смещения увеличиваются и через 75 с (рис.2,д) наблюдается сформированный поток истечения и не установившееся движение на первой стадии выпуска переходит в

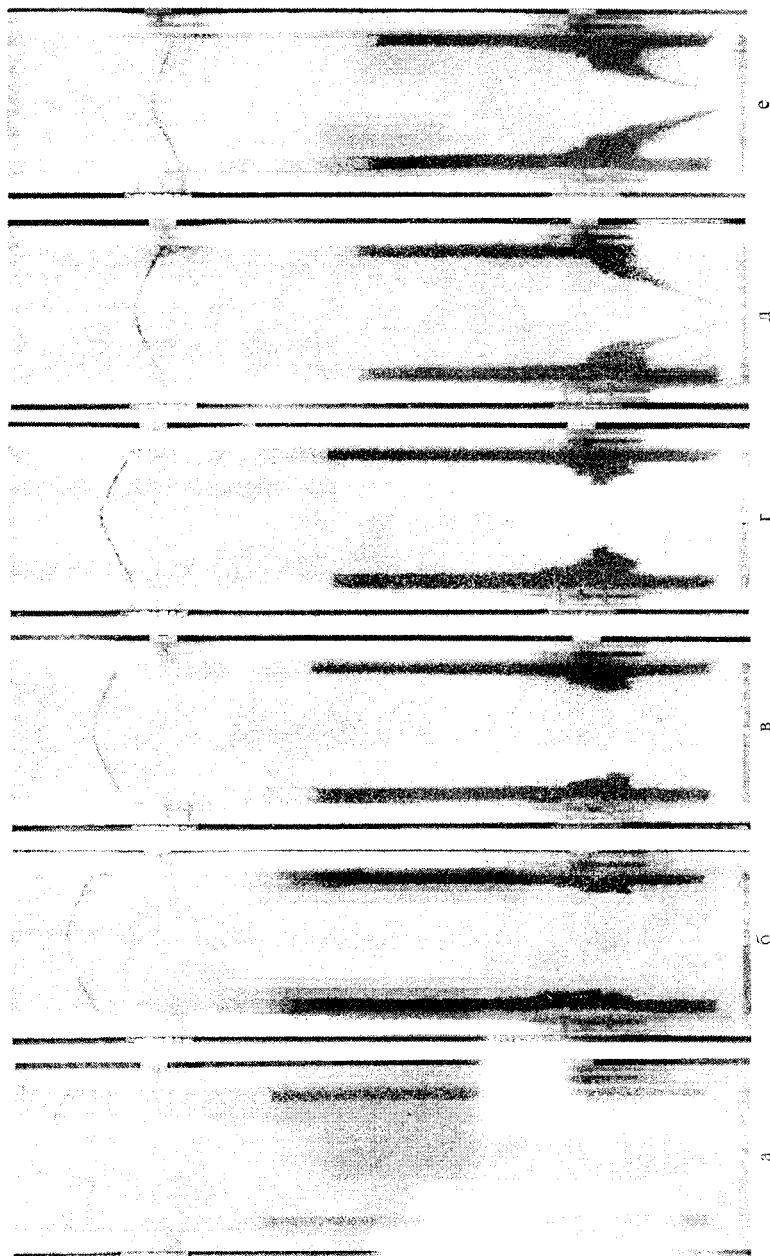


Рис.2 — Перемещения сыпучего на диаметральной плоскости во времени:
а, б, в, г, д, е — соответственно через 15, 30, 45, 60, 75, 90 с после начала выпуска

установившееся, т.е. наступает вторая стадия движения.

Приведенные схемы движения подтверждают принятую физическую модель истечения.

2. Первая стадия истечения (неустановившееся движение).

Исходные предпосылки:

- все частицы сыпучего материала в зоне дилатансии и в воронке истечения движутся к выпускному отверстию по прямым линиям (рис.1,а,б);
- используется принцип неразрывности струй;
- движение сыпучего в зоне дилатансии (разуплотнение происходит за счет увеличения первоначального объема в λ раз, где λ — коэффициент дилатансии;
- границы зоны дилатансии являются функцией объема разуплотненного материала.

Используя вторую предпосылку и схему на рис.3 с условными обозначениями, запишем соотношение скоростей любого луча в сечении выпускного отверстия (r_o) и в сечении на расстоянии l :

$$v_r = v_{r_o} \left(\frac{r_o}{l} \right)^2. \quad (1)$$

В соответствии с третьей и четвертой предпосылками длину луча l , расположенного под произвольным углом α , будем определять в зависимости от объема истечения в пределах струи ρ_o и приращения объема за счет дилатансии

$$\Delta V = V_o - V = (\lambda - 1)V. \quad (2)$$

За время выгрузки t_i сыпучего материала через любое сечение струи в пределах зоны разуплотнения (например, в уровне выпускаемого отверстия r_o) вытекает объем сыпучего

$$\Delta V = A_{r_o} v_{r_o} t_i,$$

где A_{r_o} — площадь поперечного сечения элементарной струи.

Зная объем разуплотненного материала в струе, можно определить ее длину. Пусть струя имеет форму усеченного конуса и наклонена к горизонтالي под углом α (рис.3). Тогда выразим объем усеченного конуса с размером струи ρ_o , в котором произошло разуплотнение, в виде

$$V = \frac{\pi l^2 d \beta d\alpha}{3} - \frac{\pi r_o^2 (d\beta d\alpha)}{3}, \quad (3)$$

а объем выпуска сыпучего через сечение r_o за время t_i представим как

$$V(\lambda - 1) = \pi r_o^2 v_{r_o} t_i d\beta d\alpha. \quad (4)$$

Приравнявая объемы V по формулам (3) и (4) и учитывая, что $r_o = \frac{d}{2 \cos \varphi}$, получим

$$v_{r_o} = Cl^3 - D, \quad (5)$$

где $C = \frac{4(\lambda - 1) \cos^2 \varphi}{3 d^2 t_i};$

$$D = \frac{d(\lambda - 1)}{6 \cos \varphi t_i}.$$

Зависимость (5) устанавливает связь между начальной скоростью струи у выпускного отверстия, временем выпуска t_i и длиной луча l_γ с разуплотненным материалом. Учитывая, что второе слагаемое имеет второй порядок малости, в преобразованном виде формула (5)

$$v_{r_o}(\alpha) = \frac{4(\lambda - 1) \cos^2 \varphi}{3 d^2 t} l_{on}^2(\alpha) \quad (5a)$$

использована для обработки экспериментальных данных [1] и построения эпюры скоростей в уровне выпускаемого отверстия как функции угла наклона α . Эти данные приведены на рис.4, из которого следует, что максимальные скорости выпуска имеют место при $\alpha = 90^\circ$ и по мере снижения угла до $\alpha = \varphi$ скорость истечения практически равна нулю. Эти данные не противоречат опубликованным в литературе [2, 3, 4 и др.].

В формуле (5a) при фиксированном значении t имеются две переменные v_{r_o} и l . Воспользуемся данными исследований Покровско-

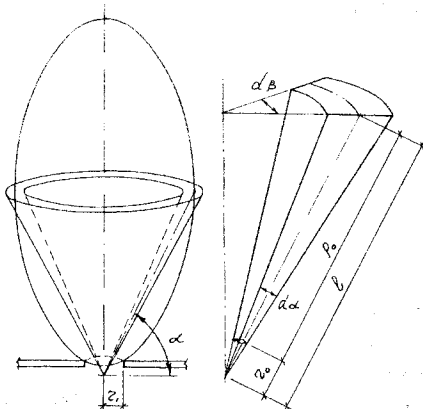


Рис.3 – Схема к расчету осесимметричного истечения

го Г.И. и Арефьева А.И. [5] об истечении сыпучих материалов из выпускных отверстий различного диаметра. Они свидетельствуют о том, что объем выпуска в единицу времени не зависит от высоты засыпки H и является функцией радиуса выпускного отверстия

$$V = \eta_1 r_1^{2.86} t. \quad (6) \quad v_{r_o}(\alpha)/v_{r_o}(90^\circ)$$

Объем выпуска можно записать и так:

$$V = A_o \bar{v} t, \quad (7)$$

где A_o – площадь выпускного отверстия; $\bar{v}$ – средняя скорость истечения через выпускное отверстие.

Естественно предположить, что условие (6) справедливо как для средней скорости истечения, так и для ее составляющих под углом α .

В таком случае приравняем (6) и (7) и учтем, что

$$A_o = \pi r_1^2:$$

$$v_{r_o}(\alpha) = \eta r^{0.86}. \quad (8)$$

Экспериментами установлено, что параметр η можно принять равным $90, \text{см}^{0.14}/\text{с}$, тогда

$$v_{r_o}(\alpha = 90^\circ) = 90 r^{0.86}. \quad (9)$$

Закономерность изменения скоростей в функции α запишем в виде

$$v_{r_o}(\alpha) = v_{r_o}(\alpha = 90^\circ) \cdot F(\alpha). \quad (10)$$

Для функции $F(\alpha)$ предлагаем эмпирическое выражение

$$F(\alpha) = \sin^m \alpha, \quad (11)$$

где $m = \alpha - 20$ – параметр, зависящий от крупности частиц сыпучего, условий загрузки, влажности и др.

Используя (8)-(11), получим

$$v_{r_o}(\alpha) = 90 r_1^{0.86} \sin^m \alpha. \quad (12)$$

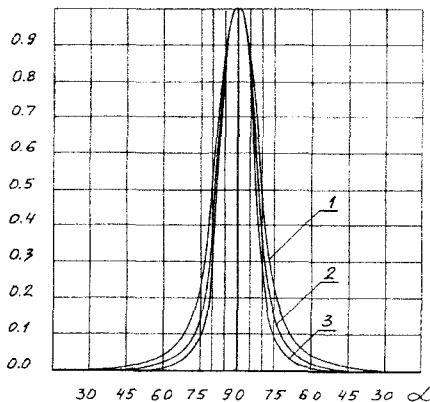


Рис.4 – Изменение скорости истечения в уровне выпускного отверстия: 1,3 – опытные значения; 2 – по формуле (12)

С помощью (5а) окончательно имеем выражение для определения длины луча струи в зоне разуплотнения:

$$l^3(\alpha) = 27r_1^{2,86} t \frac{\sin^m \alpha}{(\lambda - 1) \cos^2 \varphi}. \quad (13)$$

На рис.5 пунктирной линией показана фигура эллипсоида вращения, полученная как средняя из 4-х опытов на модели силоса при $t=15$ с. Сплошными линиями показаны расчетные по формуле (13) фигуры зон разуплотнения для разных моментов времени ($t=15, 10$ и 5 с). Констатируя удовлетворительное соответствие расчетных и опытных данных, отметим, что зависимость (13) может быть использована и для расчета отметки z , на которой произойдет исчерпание прочности кольцевой зоны.

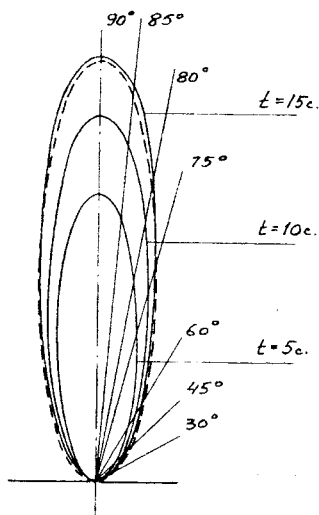


Рис.5 – Зоны разуплотнения сыпучего над выпускным отверстием:

--- опытные; ——— расчетные по формуле (13)

Определим положение этой области, приняв обозначения по рис.6. Будем исходить из равенства усилий в сыпучем материале по вертикальному направлению для состояния покоя и при движении на первой стадии выпуска. Время выпуска принимаем фиксированным.

Усилия от вертикального давления сыпучего на уровне z в состоянии покоя представим в виде

$$N_g = P_g \cdot \pi r^2.$$

При движении сыпучего (выпуске) усилие в пределах зоны разуплотнения ($P_g = P_z$) получим:

$$N_z = kP_g \pi y^2;$$

а усилие в кольцевой области выразим как

$$N_k = P_{гк} \pi (r^2 - y^2).$$

Из условия равновесия

$$N_{\sigma} = N_z + N_{\kappa} \quad (14)$$

получим

$$P_{\sigma\kappa} = \frac{P_{\sigma}}{r^2 - y^2} (r^2 - \kappa y^2). \quad (15)$$

Переменную y в формуле (15) находим с учетом зависимости (13). Учитывая сложность этих выражений, в качестве упрощения на стадии анализа воспользуемся аппроксимацией в виде уравнения эллипса

$$\frac{y^2}{\sigma^2} + \frac{z_o^2}{a^2} = 1,$$

записанного относительно осей, проходящих через центр тяжести сечения.

Это уравнение относительно оси z будет иметь вид

$$y = \pm \sigma \sqrt{1 - \frac{(H - z - a)^2}{a^2}} \quad \text{при } (H - 2a) \leq z \leq H. \quad (16)$$

Используя зависимость Янсения для вертикального давления и значение y по формуле (16), из (15) получим

$$P_{\sigma\kappa} = \frac{\gamma \rho}{\kappa f} \left[1 - \exp\left(-\frac{\kappa f z}{\rho}\right) \right] \left\{ \frac{a^2 r^2 (1 - \kappa)}{a^2 r^2 - \sigma^2 [a^2 - (H - z - a)^2]} + \kappa \right\}. \quad (17)$$

Из экстремума функции $P_{\sigma\kappa}$

$$\frac{dP_{\sigma\kappa}}{dz} = \frac{\gamma B}{F} \left[\frac{a^2 r^2 (1 - \kappa) + F \kappa}{F} \right] + \frac{\gamma \rho B a^2 r^2 (1 - \kappa) b^2 (2H - 2z - 2a)}{\kappa f F^2} = 0, \quad (18)$$

где $B = \exp\left(-\frac{\kappa f z}{\rho}\right)$; $F = a^2 r^2 - \sigma^2 [a^2 - (H - z - a)^2]$.

Не приводя значение функции z , полученное из (18), ввиду его громоздкости, отметим, что положение кольцевой области с максимальным вертикальным давлением и возможным нарушением условий прочности в зависимости от вариации параметров может иметь место при $6,7r \leq z \leq 8,05r$. Если вести отсчет от уровня выпускного отверстия, то область повышенных давлений будет располагаться над ним

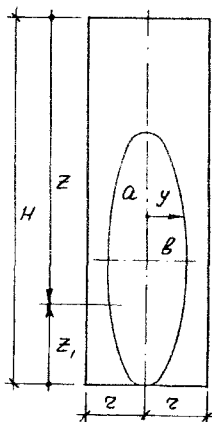


Рис.6 – Принятые обозначения

на высоте $(1,95 \div 3,3)r$, что удовлетворительно согласуется с результатами проведенных экспериментальных исследований на моделях и на натурном силосе для зерна [6].

Таким образом, определена граница расположения области вертикальных и горизонтальных давлений в силосе при выпуске сыпучего материала. Эти давления сохраняются на стадии установившегося движения. Их расчет будет приведен в следующей статье.

1. Молодченко Г.А. Проведение НИР и разработка рекомендаций по назначению давления сыпучего материала при истечении в зависимости от относительной высоты (при соотношении высоты к диаметру от 1,5 до 5,0) // Сб. реф. НИР и ОКР: Строительство. Архитектура. Серия 14. – 02830053785. – ХПСНИИП. – Отчет. – 167 с. – ВНИИЦ, 1986. – №8. – С. 14.

2. Курочкин А.М. Давление зерна в силосах // Исследование напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. Сб. науч. тр. Вып.2 / Под ред. Трухлова А.М. – Саратов: СПИ, 1969. – С.118-225.

3. Соловых С.Ф. О связи напряженного состояния сыпучего с формой движения его в силосе // Изв. ВУЗов "Строительство и архитектура". – 1962. – №5. – С.33-38.

4. Тюзун У., Неддерман Р. Экспериментальное доказательство кинематического моделирования течений гранулированных сред в отсутствие сопротивления воздуха // Механика гранулированных сред. Сб. статей. Пер. с англ. / Сост. И.В.Ширко. – М.: Мир, 1985. – С.192-209.

5. Покровский Г.И., Арефьев А.И. Об истечении сыпучих тел // ЖТФ. – 1937. – Т. VII, вып.4. – С.424-427.

6. Молодченко Г.А. Давление зерна на стенки силоса // Исследование напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. Вып.6. – Саратов: СПИ, 1977. – С.82-93.

Получено 10.05.2000

УДК 628.33

О.П.КОВАЛЬ, В.И.КРАСНОВ

Харьковский государственный технический университет
строительства и архитектуры

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПАКТНЫХ ОЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В современных условиях ощущается потребность в компактных установках подготовки чистой питьевой воды. Это необходимо для жилых домов и гражданских сооружений в местах, где отсутствует централизованное водоснабжение и как источник воды можно использовать только имеющиеся в наличии поверхностные водные объекты.

Основными источниками питьевого водоснабжения в Украине являются поверхностные источники (рр.Днепр, Южный Буг, Днестр, Северский Донец с их притоками, водохранилища). Практически воды всех рек Украины имеют органические загрязнения, в основном при-