

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И СКОРОСТИ ЕЕ ДИССИПАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОБЕТОННОЙ СМЕСИ

dibr1984@yandex.ru

*В статье кратко представлена схема получения пенобетонной смеси в мобильной установке.*

*Приведены формулы расчета кинетической энергии и скорости ее диссипации, а также наглядные графики численных расчетов.*

**Ключевые слова:** турбулентность, кинетическая энергия, скорость диссипации.

В результате анализа существующих схем и оборудования предложена новая конструкция мобильной установки для получения пенобетона (рис.1), защищенная патентом на полезную модель [1]. Процесс получения смеси следующий. В бункер засыпается цемент, наполнитель, пенообразователь и заливается вода. Включается электрический привод и компоненты перемешиваются путем многократного прохождения через

сегменты ротора и статора. Готовая смесь отводится через выходное отверстие, которое при процессе перемешивания закрывается при помощи крана. Данное решение, позволяет нам уйти от использования смесителя и системы транспортирования предварительной смеси, что позволит увеличить мобильность установки и уменьшить материальные затраты на дополнительное оборудование.

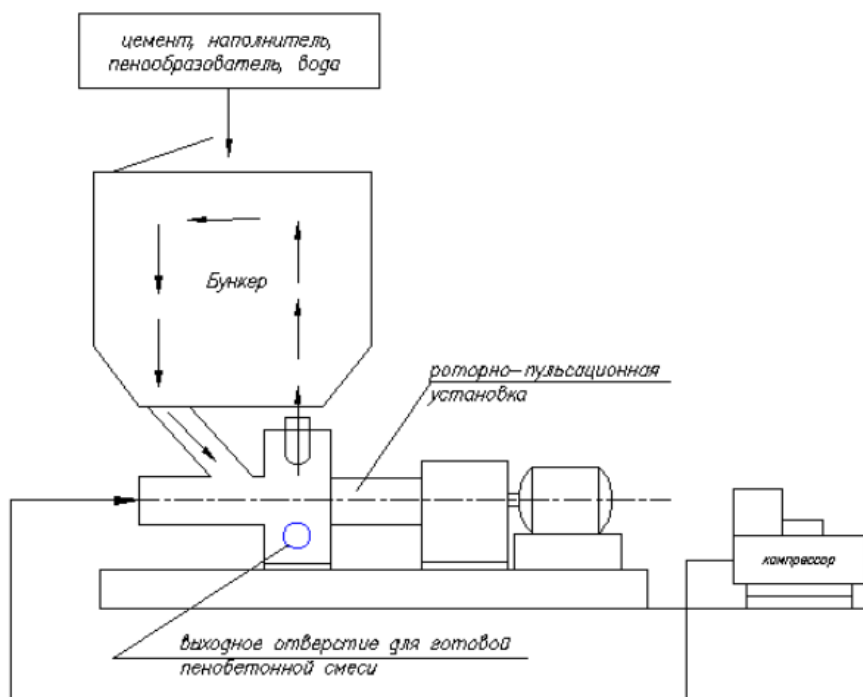


Рисунок 1. Схема установки для получения пенобетонной смеси

Ранее были получены выражения для кинетической энергии турбулентности  $k_T$  и скорости ее диссипации с учетом осевой симметрии задачи.

$$V_r \frac{dk_T}{dr} = v \left[ \frac{d^2 k_T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dk_T}{dr} \right] + G - \varepsilon,$$

$$V_r \frac{d\varepsilon}{dr} = v \left[ \frac{d^2 \varepsilon}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varepsilon}{dr} \right] + \frac{\varepsilon}{k_T} (c_1 G - c_2 \varepsilon), \tag{1}$$

где диссипативная функция  $G = G_r + G_\varphi$ ,

здесь  $G_{r,z}$  – радиальная составляющая и  $G_\varphi$  – тангенциальная составляющая описываются выражениями:

$$G_r = v \left[ \left( \frac{dv_r}{dr} \right)^2 + \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right],$$

$$G_\varphi = v \left[ \left( r \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\varphi}{r} \right) \right)^2 - \frac{d}{dr} \left( \frac{v_\varphi^2}{r} \right) \right]. \quad (2)$$

Как показывают численные эксперименты [2,3], в процессе развития происходит генерация турбулентности вблизи стенок трубы. При этом сама турбулентность распределяется неравномерно, прежде всего, в местах изменения профиля трубы. Поскольку в нашем случае имеет место регулярный участок малой длины между двумя коаксиальными цилиндрами влиянием скорости диссипации на изменение кинетической энергии в первом приближении можно пренебречь. Таким образом, первое уравнение системы (1) становится независимым.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) используются значения радиальной  $V_r$  и окружной  $V_\varphi$  скорости, вычисленные в  $n$  точках зазора между цилиндрами. Помимо этого необходимо задать граничные условия. Вблизи стенок цилиндров велики градиенты скоростей, поэтому следует учитывать вязкое трение наряду с турбулентным. Для этого в расчетах численными методами вводится так называемая пристеночная функция [4]. Пристеночная функция представляет собой универсальный закон стенки в предположении о существовании вблизи нее течения Куэтта.

Полагая, что пристеночная турбулентность является равновесной, т.е. скорости генерации и диссипации турбулентности равны, граничное условие для кинетической энергии турбулентности  $k_T$  в узле, ближайшем к стенке, можно записать в виде:

$$\frac{dk_T}{dr} = 0. \quad (3)$$

Кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации на границе задаем по формулам [4]:

$$k_T = \frac{0,2(\omega_0 R_1)^2}{4}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{0,1643k_T^{1,5}}{l_T}, \quad (5)$$

где  $l_T = 0,09 R_1$  – масштаб турбулентности.

Для расчетов значения постоянных  $k_T$  и  $\varepsilon$  принимали в соответствии с теорией пристеночного пограничного слоя и плоских струй [4]:

$$C_v = 0,09, \quad C_1 = 1,45, \quad C_2 = 1,9, \\ C_D = 1,0, \quad \sigma_E = 1,3$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений (1)-(2) совместно с граничными условиями (5) представляет собой математическую модель движения смеси в зазоре между коаксиальными цилиндрами. Модель решается численно методом конечных разностей. Конечно-разностная схема решения задачи имеет вид:

$$\begin{cases} \left( \frac{v}{h^2} + \frac{v}{r_i} - \frac{2Q_0}{\pi D_2 r_i} \right) k_{i+1} - \frac{2v}{h^2} k_i + \left( \frac{v}{h^2} - \frac{v}{r_i} + \frac{2Q_0}{\pi D_2 r_i} \right) k_{i-1} + G_i = 0, \\ \left( \frac{v}{h^2} + \frac{v}{r_i} - \frac{2Q_0}{\pi D_2 r_i} \right) \varepsilon_{i+1} + \left( c_1 G_i \frac{1}{k_i} - \frac{2v}{h^2} \right) \varepsilon_i - \frac{c_2}{k_i} \varepsilon_i^2 + \left( \frac{v}{h^2} - \frac{v}{r_i} + \frac{2Q_0}{\pi D_2 r_i} \right) \varepsilon_{i-1} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где диссипативная функция  $G = G_r + G_\varphi$ ,

здесь  $G_{r,z}$  – радиальная составляющая и  $G_\varphi$  – тангенциальная составляющая описываются выражениями:

$$G_{r,i} = 2v \left( \frac{2Q_0}{\pi D_2} \right)^2 \frac{1}{r_i^4},$$

$$G_{\varphi,i} = v \left\{ \left[ \Gamma_i \frac{1}{2h} \left( \frac{V_{\varphi,i+1}}{r_{i+1}} - \frac{V_{\varphi,i-1}}{r_{i-1}} \right) \right]^2 - \frac{1}{2h} \left( \frac{V_{\varphi,i+1}^2}{r_{i+1}} - \frac{V_{\varphi,i-1}^2}{r_{i-1}} \right) \right\}. \quad (7)$$

Краевые условия задачи имеют вид:

$$k_1 = \frac{0,2(V_{r,1} + V_{\varphi,1})^2}{4},$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0,1643k_1^{1,5}}{l_T},$$

$$l_T = 0,09R_1,$$

$$\begin{aligned} k_{n+1} &= 0, \\ \epsilon_{n+1} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Цилиндрическую область между двумя коаксиальными цилиндрами заменяли дискретным аналогом, состоящим из (n+1) узла в радиальном направлении. Получаем две системы нелинейных алгебраических уравнений относительно узловых значений кинетической энергии турбулентности  $k_i$  и скорости диссипации  $\epsilon_i, i = 1, n$ .

Причем вычисленные значения  $k_i$  использовались как заданные для подсчета скорости диссипации  $\epsilon_i$ . Решение полученных систем алгебраических уравнений выполнялось численно на языке программирования MAPLE. Результаты вычислений представлены на рис. 2, 3.

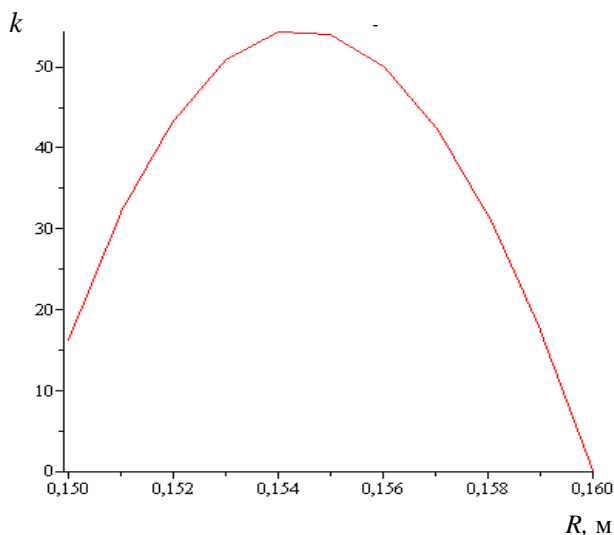


Рисунок 2. Изменение кинетической энергии при  $n = 1147$  об/мин,  $R_1 = 0,15$  м,  $R_2 = 0,16$  м.

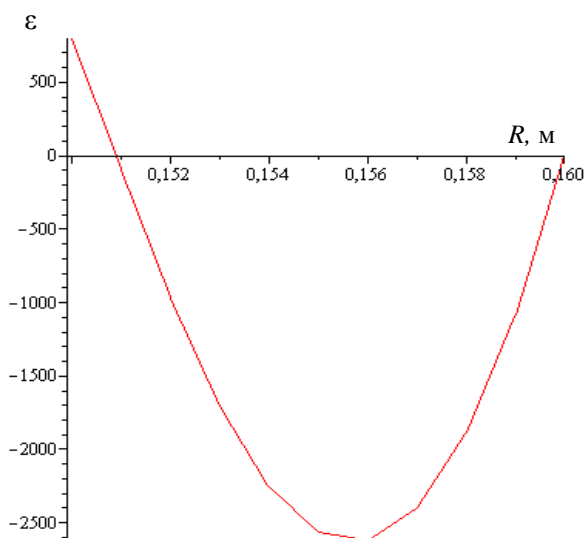


Рисунок 3. Значение скорости диссипации при  $n = 1147$  об/мин,  $R_1 = 0,15$  м,  $R_2 = 0,16$  м.

Как видно из этих рисунков значение кинетической энергии сильно возрастает к середине зазора между цилиндрами, а затем резко падает. При этом скорость диссипации падает в этом же направлении.

На рис. 4 и 5 представлены результаты вычислений кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации  $\epsilon$  для  $n = 1147, 1250, 1500, 1750, 1850$  об/мин при  $R_1 = 0,14$  м,  $R_2 = 0,17$  м.

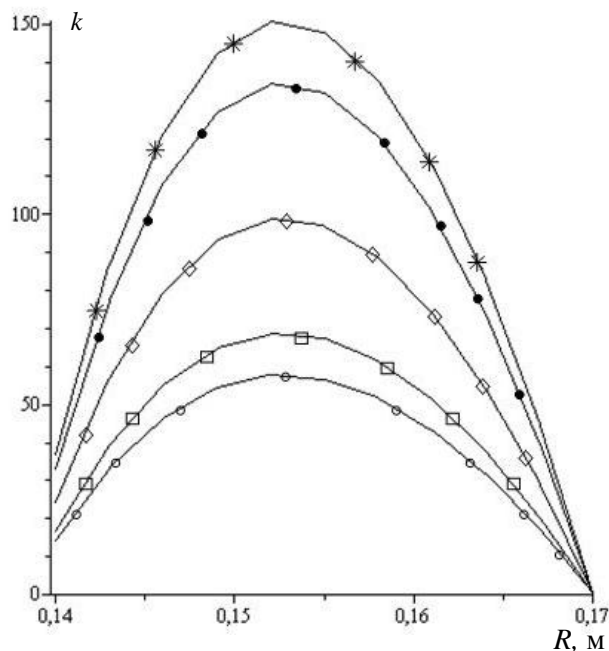


Рисунок 4. Значение кинетической энергии при  $n$ :  $\circ$  - 1147 об/мин;  $\square$  - 1250 об/мин;  $\diamond$  - 1500 об/мин;  $\bullet$  - 1750 об/мин;  $\ast$  - 1853 об/мин

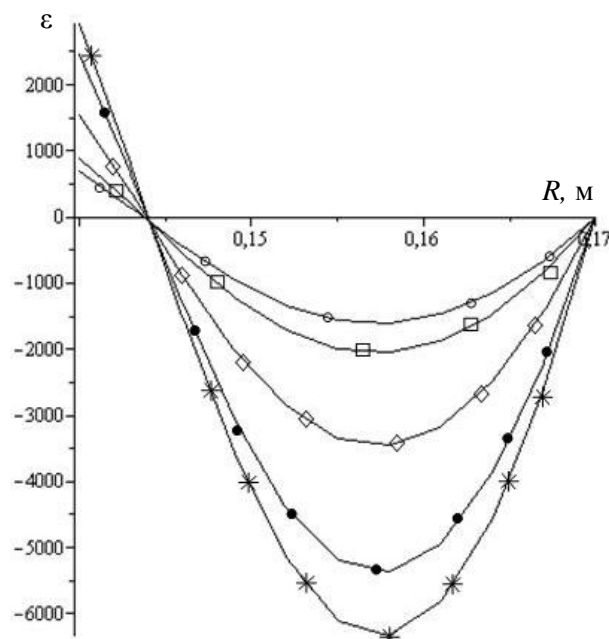


Рисунок 5. Значение скорости диссипации при  $n$ :  $\circ$  - 1147 об/мин;  $\square$  - 1250 об/мин;  $\diamond$  - 1500 об/мин;  $\bullet$  - 1750 об/мин;  $\ast$  - 1853 об/мин

Таким образом, очевидно, что при увеличении количества оборотов скорость диссипации уменьшается.

На рис. 6 совмещены результаты расчетов  $k$  и  $\varepsilon$  при  $n = 1500$  об/мин.

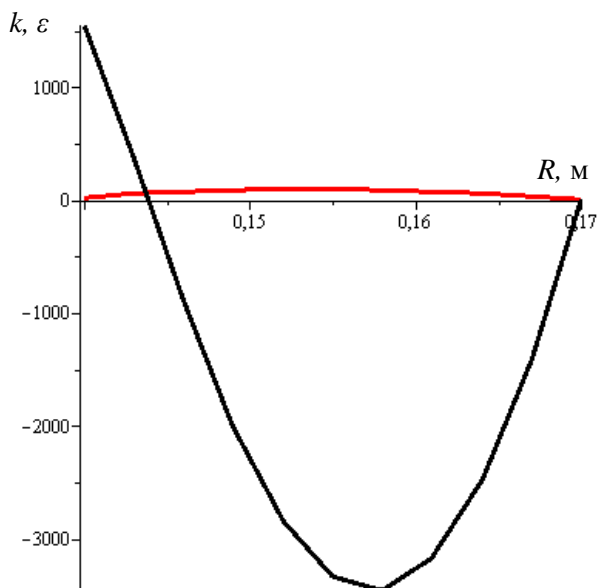


Рисунок 6. Значение кинетической энергии и скорости диссипации при  $n=1500$  об/мин

Следует отметить, что максимум кинетической энергии  $k$  приходится на максимальное (по абсолютной величине) значение скорости дис-

сипации  $\varepsilon$ , что подтверждает сделанные ранее предположения о характере протекания процесса получения пенобетона в предложенной установке.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Положительное решение от 17.05.2011г. по заявке №2011108841, кл. В28С 5/38. Роторно-пульсационный комплекс для производства пенобетона // Ибрагимов Д.В., Щербинина О.А., Щербинин И.А., Шахова Л.Д., Уваров В.А./.
2. Дик И.Г. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне / И.Г. Дик, О.В. Матвиенко, Т. Неессе // Теоретические основы химической технологии, т. 34, 2000. – С. 478–488.
3. Третьяков В.В. Расчетное исследование турбулентного закрученного течения в трубе. /В.В. Третьяков, В.И. Ягодкин// Инженерно-физический журнал, т. XXXVII, 1979. – С. 255–259.
4. Сажин Б.С. Математическое моделирование движения газа в сепарационной зоне проточного вихревого аппарата на основе ( $k_T - \varepsilon$ ) модели турбулентности / Б.С. Сажин, А.В. Акулич, В.Б. Сажин // Теоретические основы химической технологии, т. 35, 2001. – С. 472–478.