

Овчинников Д. А., аспирант  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНЖЕКТОРА ПНЕВМОСТРУЙНОГО АКТИВАТОРА ЦЕМЕНТА

ovchinnikov\_d\_a@mail.ru

*В установке для пневматической механоактивации цемента используется инжекторный смеситель вяжущего с воздухом.*

*Экспериментально установлено, что наилучшее смешивание исходного материала с воздухом достигается при совмещении среза сопла с входным сечением разгонной трубки.*

*Возрастание скорости воздушного потока приводит к уменьшению статического давления ниже атмосферного. Под действием возникающего разрежения наружный воздух вместе с активируемым материалом засасывается в разгонную трубку.*

*Далее, в результате расширения поперечного сечения и вовлечения в движение дисперсной фазы, скорость воздушного потока снижается, а статическое давление повышается.*

*На разгонном участке энергия рабочего газа передается дисперсной фазе, в результате чего происходит её ускорение. Экспериментально установлено, что в разгонных трубках струйных мельниц частицы ускоряются до 0,4-0,5 средней скорости газа.*

**Ключевые слова:** инжектор, пневмоструйный активатор, цемент, пневматическая, механоактивация, смеситель, вяжущее, сопло, разгонная трубка, воздушный поток, статическое давление.

Перспективным направлением снижения расхода цемента и повышения качества строительных и бетонных растворов является его ме-

ханическая активация в пневмоструйной установке [1]. Схема установки приведена на рис. 1.

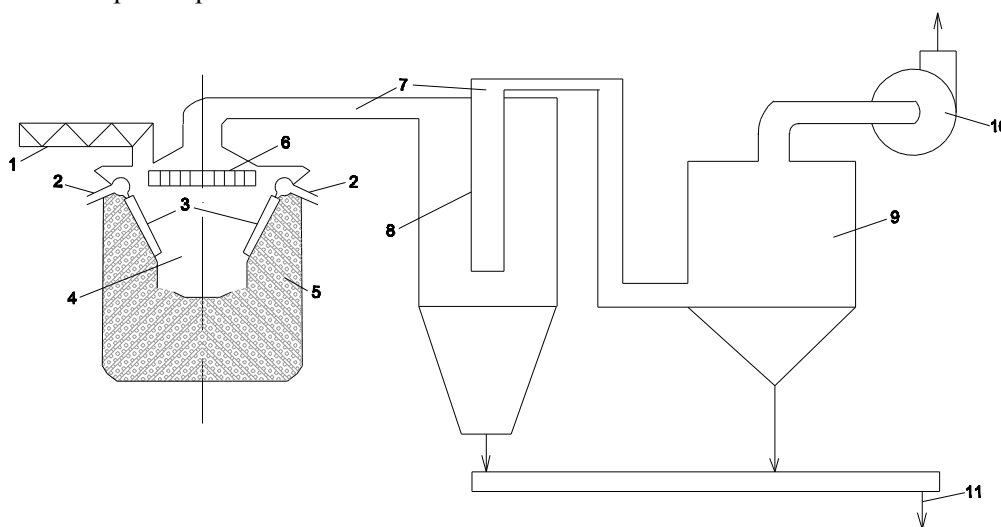


Рис. 1. Схема установки для пневматической механоактивации цемента

1 – материалопровод исходного цемента; 2 – инжекторы; 3 – разгонные трубки; 4 – рабочая камера; 5 – клинкер; 6 – сепаратор; 7 – воздуховоды; 8 – циклон; 9 – рукавный фильтр; 10 – вентилятор; 11 – выход готового продукта

Эффективность активации цемента в значительной мере определяется работой смесительно-разгонного узла активатора.

В установке для пневматической механоактивации цемента используется инжекторный смеситель вяжущего с воздухом.

Экспериментально установлено [2], что наилучшее смешивание исходного материала с воздухом достигается при совмещении среза сопла с входным сечением разгонной трубки (рис. 2).

В этом случае роль камеры смешивания выполняет начальный участок разгонной трубки длиной  $l_{см}$ :

$$l_{см} = \frac{d_T - d_c}{2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

где  $d_T$ ,  $d_c$  – диаметры разгонной трубки и сопла,  $\theta \approx 26^\circ$  – угол разлета струи энергоносителя, истекающей в разгонную трубку.

К участку подсоса и смешивания примыкает участок разгона частиц, длина которого  $l_{pz}$

определяется из условий достижения наибольшей скорости частиц и минимального абразивного износа трубки.

Общие закономерности работы инжектора исследуем в рамках его интегральной двухжид-

костной модели, основанной на законах сохранения массы, импульса и энергии. На основе этого рассмотрения могут быть поставлены граничные условия для дифференциальных уравнений, описывающих разгон частиц.

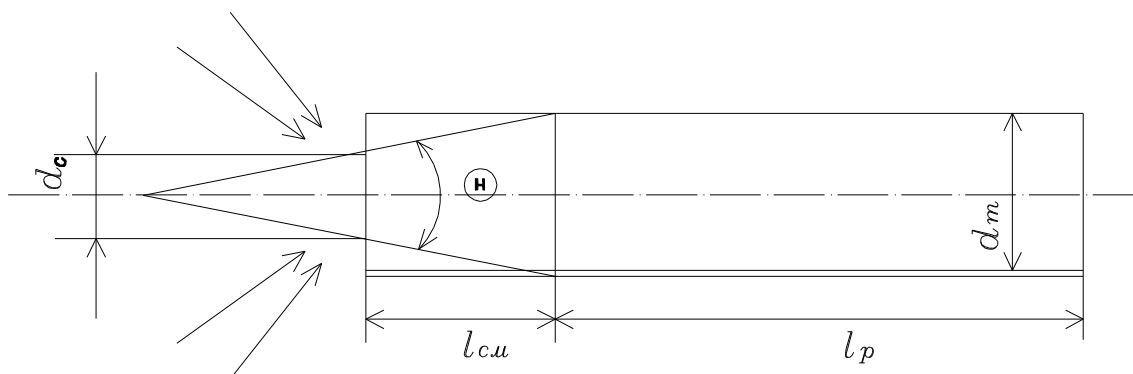


Рис. 2. Схема смесительно-разгонного узла установки

Основными технологическими параметрами смесительно-разгонного блока установки являются приходящиеся на одну разгонную трубку массовые расходы исходного материала – цемента  $G_u$ , возвращаемого на повторную активацию грубого продукта (крупки)  $G_{кр}$ , рабочего воздуха (энергоносителя)  $G_p$  и инжектируемого (подсасываемого) воздуха  $G_u$ .

Эти компоненты смешиваясь в начале разгонной трубки образуют газоматериальную смесь, фазы которой описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} G_e &= G_p + G_u = G_p(1 + \mu_e) = f_T w(1 - \beta)\rho, \\ G_T &= G_u + G_{кр} = G_c n_u = f_T S w \beta \rho_T = G_p \mu_T. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\mu_e = G_u/G_p$  - коэффициент инжекции (подсоса) наружного воздуха;  $w, w_T$  – среднерасходные скорости газовой и дисперсной фаз;  $\rho, \rho_T$  - плотности этих фаз;  $\beta$  - объемная концентрация твердой фазы; т.е. суммарный объем всех частиц, находящихся в 1 м<sup>3</sup> смеси, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $G_T$  – массовый выход готового продукта в пересчете на одну разгонную трубку, кг/с;  $G_{кр}$  – массовый расход возврата, т.е. грубого продукта сепарации активированного цемента, кг/с;  $n_u = G_T/G_e$  - кратность циркуляции;

$\mu_T = G_T/G_p$  - коэффициент инжекции материала;  $S = w_m/w$  - коэффициент скольжения фаз,  $f_T$  – площадь поперечного сечения разгонной трубки. С коэффициентом инжекции материала связан удельный расход энергоносителя  $U$ :

$$U = G_p / G_T = 1 / \mu_T, \quad (3)$$

массовая концентрация твердой фазы  $\mu$ :

$$\mu = G_T / G_e = \mu_T / (1 + \mu_e) \quad (4)$$

а также её расходная концентрация:

$$x = \frac{G_T}{G_e + G_T} = \frac{\mu_T}{1 + \mu_T} \quad (5)$$

Связь между массовой и объемной концентрациями твердой фазы вытекает из соотношений (2):

$$\mu = S \frac{\rho_T}{\rho} \cdot \frac{\beta}{1 - \beta}; \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\mu \rho}{\mu \rho + S \rho_T}. \quad (7)$$

Скорость истечения и массовый расход сжатого воздуха определяются его давлением  $P_0$  и температурой  $T_0$  в ресивере, а также параметрами внешней среды  $P_1$  и  $T_1$ .

Как правило, давление внешней среды  $P_1$  меньше критического давления  $P_{кр} = 0,527P_0$ , поэтому скорость истечения сжатого воздуха из сопла  $w_c$  приближается к скорости звука во внешней среде:

$$w_c = c_1 = \sqrt{kRT_1}, \quad (8)$$

где  $k=1,405$  – показатель адиабаты,  $R = 287,14$  Дж/(кг·К) – газовая постоянная воздуха,  $T_1$  – абсолютная температура внешней среды. При  $t_1=20^\circ\text{C}$  ( $T_1=293\text{K}$ ),  $c_1=344$  м/с. При входе в разгонную трубку часть скорости воздуха теряется, поэтому:

$$w_{p1} = \varphi C_1, \quad (9)$$

где  $\varphi = 0,9$  – коэффициент потери скорости. При  $t_1=20^\circ\text{C}$   $w_{p1}=309,4$  м/с.

При критическом режиме истечения массовый расход энергоносителя определяется соотношением:

$$G_p = 0,685 \mu f_c \sqrt{P_0 \rho_0}, \quad (10)$$

где  $\mu = 0,82$  – коэффициент расхода,  $f_c$  – площадь сечения сопла,  $P_0$  – давление,  $\rho_0 = P_0/(RT_0)$  – плотность сжатого воздуха.

Будем рассматривать фазы газоматериальной смеси как две сплошные взаимопроникающие и взаимодействующие среды жидкости [3]. Тогда средние скорости движения фаз на разгонном участке можно представить в виде:

$$w_T = \frac{G_T}{f_T \beta \rho_T} = \frac{U_1}{\beta}; \quad (11)$$

$$w = \frac{G_g}{f_T (1 - \beta) \rho} = \frac{U_2}{1 - \beta}, \quad (12)$$

где  $U_1 = G_T/(f_T \rho_T)$ ,  $U_2 = G_g/(f_T \rho)$  – фиктивные скорости, которые имели бы фазы, если бы они по отдельности полностью занимали все пространство разгонной трубки. Исключив из формул (11) и (12)  $\beta$ , получим соотношение, связывающее между собой средние скорости движения фаз:

$$w = \frac{U_2 w_T}{w_T - U_1}. \quad (13)$$

В результате аэродинамического взаимодействия средние скорости движения фаз сближаются, т.е. стремятся к некоторому предельному значению  $w_{np}$ . Получив в формуле (2.33)  $w = w_{np}$ , получим:

$$w_{np} = U_1 + U_2. \quad (14)$$

Объемная концентрация твердой фазы  $\beta$ , как следует из формулы (7) зависит от величины коэффициента скольжения фаз. Во входном сечении 1-1, где коэффициент скольжения фаз минимален  $S \approx 0,02$  величина  $\beta$  достигает наибольшего значения  $\beta_{max} \approx 0,012$ . В конце участка разгона при  $S = 0,5$  величина  $\beta$  снижается до минимального значения  $\beta_{min} = 0,0005$ .

Средние скорости движения фаз однозначно определяют их расходы, но при вычислении импульса или кинетической энергии двухфазных потоков необходимо учитывать неравномерность распределения скорости в их поперечных сечениях.

Для свободной струи чистого воздуха, истекающей из тонкой трубки, это распределение может быть выражено экспоненциальным законом [4]:

$$w(r) = w_0(x) \exp \left[ - \left( \frac{r}{cx} \right)^2 \right], \quad (15)$$

где  $c=0,82$  – эмпирическая постоянная, характеризующая интенсивность турбулентного перемешивания струи с окружающим воздухом (рис.3).

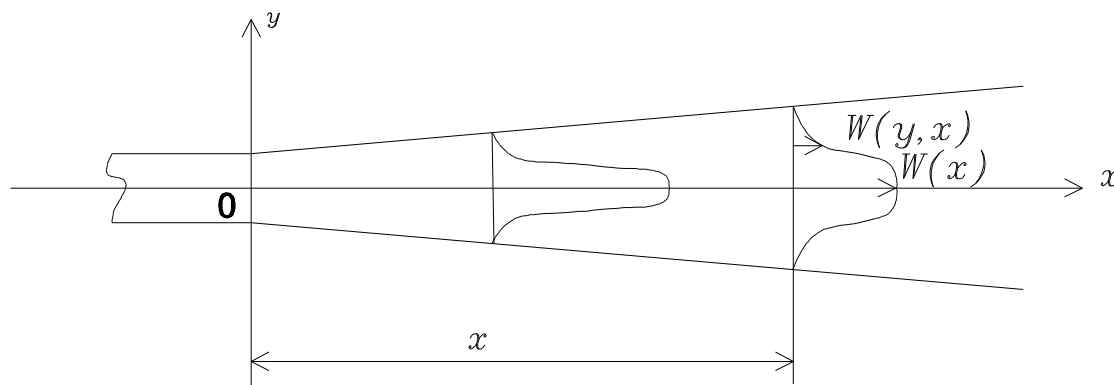


Рис. 3. Схема распределения скорости в свободной затопленной струе

Экспериментально установлено [5], что наличие примеси твердых частиц при их массовой концентрации  $\mu > 0,3$  существенно влияет на структуру свободной затопленной струи: струя становится уже и дальнобойнее. Это дает основание использовать для описания профилей скорости двухфазного потока в заданном сечении разгонной трубки (рис. 4) также экспоненциальную зависимость вида:

$$w(r) = w_0 \exp \left[ - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (16)$$

где  $w_0$  – осевая скорость воздуха в этом сечении,  $R$  – параметр, который можно выразить через  $w_0$  и скорость воздуха в пристенной зоне  $w_{ct}$ , к примеру,  $w_{ct} = w(r=0,9r_t)$ :

$$R = 0,9 \frac{r_t}{\sqrt{\ln \frac{w_0}{w_{ct}}}}. \quad (17)$$

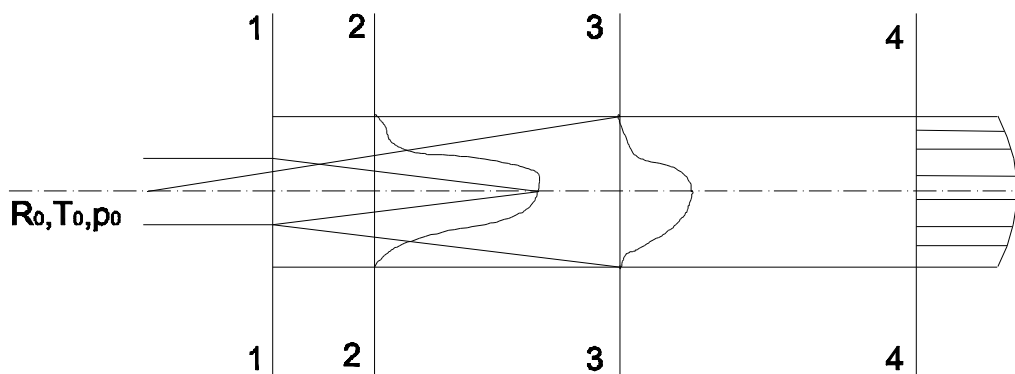


Рис. 4. Профили скорости двухфазного потока в разгонной трубке

Массовый расход воздуха, протекающего по разгонной трубке, можно найти интегрированием:

$$G_g = \rho w_0 \int_0^{r_T} \exp\left[-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \cdot 2\pi r dr = \pi \rho w_0 R^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{r_T^2}{R^2}\right)\right], \quad (18)$$

тогда среднерасходная скорость воздуха в данном сечении разгонной трубки равна:

$$w = \frac{G_g}{\pi r_T^2 \rho} = w_0 \frac{R^2}{r_T^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{r_T^2}{R^2}\right)\right]. \quad (19)$$

С помощью соотношений (16) и (18) количество движения газоматериального потока можно представить в виде:

$$I = \rho \int_0^{r_T} w^2(r) \cdot 2\pi r dr = M \cdot \pi r_T^2 \rho w^2, \quad (20)$$

где  $M$  – коэффициент Буссинеска (коэффициент количества движения):

$$M = \frac{r_T^2}{R^2} \frac{1 - \exp\left(-2\frac{r_T^2}{R^2}\right)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{r_T^2}{R^2}\right)\right]^2}. \quad (21)$$

Аналогично для кинетической энергии потока получим:

$$W = \frac{1}{2} \rho \int_0^{r_T} w^3(r) \cdot 2\pi r dr = N \cdot \frac{1}{2} N r_T^2 \rho w^3, \quad (22)$$

где  $N$  – коэффициент Кориолиса (коэффициент кинематической энергии):

$$N = \frac{1}{3} \left(\frac{r_T^2}{R^2}\right)^2 \frac{1 - \exp\left(-3\frac{r_T^2}{R^2}\right)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{r_T^2}{R^2}\right)\right]^3}. \quad (23)$$

Для сечения 2-2 разгонной трубки опытно-промышленной установки (рис. 4) параметр  $R =$

$0,645r_T$ , а коэффициент Кориолиса согласно (23) равен  $N_2 = 2,56$ . Для сечения 3-3  $R = 1,08$ , а коэффициент Буссинеска, найденный по формуле (21) равен  $M_3 = 2,61$ .

Из соотношения (19) вытекает уравнение, с помощью которого может быть уточнена величина параметра  $R$ :

$$\frac{\left(\frac{r_T}{R}\right)^2}{1 - \exp\left(-\frac{r_T}{R}\right)^2} = \frac{w_0}{w}. \quad (24)$$

Приближенное решение уравнения (24) можно получить с помощью рис. 5.

Средняя скорость воздуха во входном сечении трубки 1-1 (рис. 4) равна:

$$w_1 = \frac{G_p / \rho_0 + G_u / \rho_1}{f_T} = \frac{G_p (\rho_1 + \mu_g \rho_0)}{f_T \rho_1 \rho_0}. \quad (25)$$

В зоне смешивания (сечение 2-2) в результате расширения рабочего воздуха и сужения поперечного сечения потока из-за интенсивного вихреобразования в пристенной области скорость воздуха достигает наибольшего значения:

$$w_2 = \frac{G_p + G_u}{\rho_2 f_{сж}}, \quad (26)$$

где  $f_{сж}$  – площадь сжатого сечения.

Возрастание скорости воздушного потока приводит к уменьшению статического давления ниже атмосферного. Под действием возникающего таким образом разрежения наружный воздух вместе с активируемым материалом и крупной засасывается в разгонную трубку.

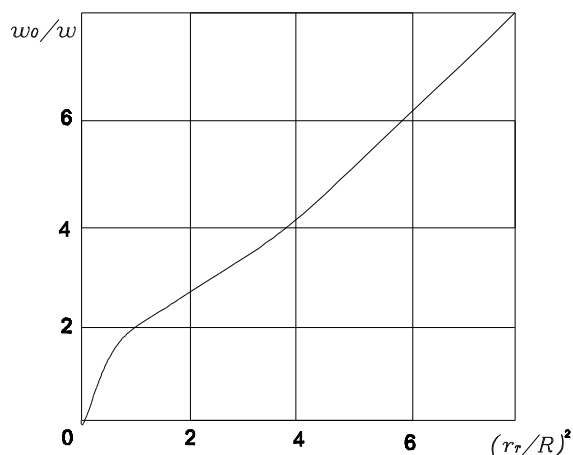


Рис. 5. Зависимость относительно осевой скорости газоматериального потока от параметра  $(r_{tr}/R)^2$

Дальше в результате расширения поперечного сечения и вовлечения в движение дисперсной фазы скорость воздушного потока снижается, а статическое давление повышается.

В начале разгонного участка (сечение 3-3) средняя скорость газовой фазы равна:

$$w_3 = \frac{G_p + G_u}{\rho_3(1 - \beta_3)f_T}. \quad (27)$$

На разгонном участке энергия рабочего газа передается дисперсной фазе, в результате чего происходит её ускорение. Экспериментально установлено, что в разгонных трубках струйных мельниц частицы ускоряются до 0,4-0,5 средней скорости газа [2]. Происходящее в результате

$$P_3 f_T + G_p w_{p1} = P_3 f_T + M_3 (G_p + G_u) w_3 + M_3 G_T w_{T3}. \quad (31)$$

Из уравнения (31) следует:

$$P_3 = P_1 + \frac{G_p w_3}{f_T} \left[ \frac{w_{p1}}{w_3} - M_3 (1 + \mu_e + \mu_T S_3) \right]. \quad (32)$$

Аналогично получим:

$$P_4 = P_1 + \frac{G_p w_4}{f_T} \left[ \frac{w_{p1}}{w_4} - M_4 (1 + \mu_e + \mu_T S_4) \right]. \quad (33)$$

Подставив в формулы (32) и (33) параметры опытно-промышленной установки, получим:  $P_3 = 105369,4$  Па, что на 404 мм вод. столба выше атмосферного и  $P_4 = 116514$  Па, т.е. инжектор развивает избыточное давление, равное 1520 мм. вод. столба.

$$\frac{G_e P_2}{\rho_2} + N_2 \left( \frac{G_p w_2^2}{2} + \frac{G_T S_2^2 w_2^2}{2} \right) = \frac{G_e P_3}{\rho_3} + N_3 \left( \frac{G_e w_3^2}{2} + \frac{G_T S_3^2 w_3^2}{2} + \frac{G_e (w_2 - w_3)^2}{2} \right), \quad (34)$$

где  $G_e = G_p + G_u$ ;  $N_2, N_3$  – коэффициенты Кориолиса; последнее слагаемое в скобках правой части уравнения (34) учитывает потерю энергии при расширении поперечного сечения потока.

этого снижение скорости воздуха оценим с помощью закона сохранения энергии. Пренебрегая потерями на трение и изменением статического давления для разгонного участка трубки получим:

$$\frac{G_e w_3^2}{2} + \frac{G_T S_3^2 w_3^2}{2} = \frac{G_e w_4^2}{2} + \frac{G_T S_4^2 w_4^2}{2}. \quad (28)$$

Отсюда следует:

$$w_4 = \sqrt{\frac{1 + \mu S_3^2}{1 + \mu S_4^2}}. \quad (29)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что для описания изменения коэффициента скольжения фаз вдоль разгонной трубки в первом приближении можно использовать простейшую линейную зависимость. Например, для опытно-промышленной установки эта зависимость имеет вид:

$$S(\tilde{x}) = 0,0477\tilde{x} + 0,023; \quad 0 \leq \tilde{x} \leq 10, \quad (30)$$

где  $\tilde{x} = x/d_T$ . Тогда с помощью формул (27) и (29) получим:  $w_3 = 59,8$  м/с,  $w_4 = 53,8$  м/с.

Параметры газоматериального потока в основных сечениях разгонной трубки можно оценить с помощью теоремы импульсов и уравнения Бернулли [6]. Статическое давление в начале разгонного участка (сечение 3-3) и в его конце (сечение 4-4) найдем с помощью теоремы импульсов:

Разрежение на участке смешивания найдем с помощью уравнения Бернулли, записанного для суженного сечения 2-2 и сечения 3-3, разделяющего участки смешивания и разгона:

Пренебрегая изменением плотности воздуха вдоль разгонной трубки ( $\rho_2 = \rho_3 = \rho_a$ ) из уравнения (34) получим:

$$P_2 = P_3 - \frac{\rho_a w_3^2}{2} + \left[ \frac{N_3}{\varepsilon^2} \left( 1 + \frac{\mu_T S_3^2}{1 + \mu_e} \right) - N_3 \left( \frac{\mu_T S_3^2}{1 + \mu_e} + \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{2}{\varepsilon} + 2 \right) \right], \quad (35)$$

где  $\varepsilon = f_2 / f_{\text{пр}}$  – коэффициент сжатия поперечного сечения потока на участке смешивания.

Для опытно-промышленной установки при коэффициенте сжатия  $\varepsilon=0,75$ , что соответствует уменьшению диаметра сечения потока на 13%,

по формуле (35) получим  $P_2=99949\text{Па}$ , что соответствует разрежению  $\Delta p=1376\text{Па}=140\text{ мм в.ст.}$  Расчетное изменение параметров газоматериального потока в разгонных трубках опытно-промышленной установки показаны на рис. 6.

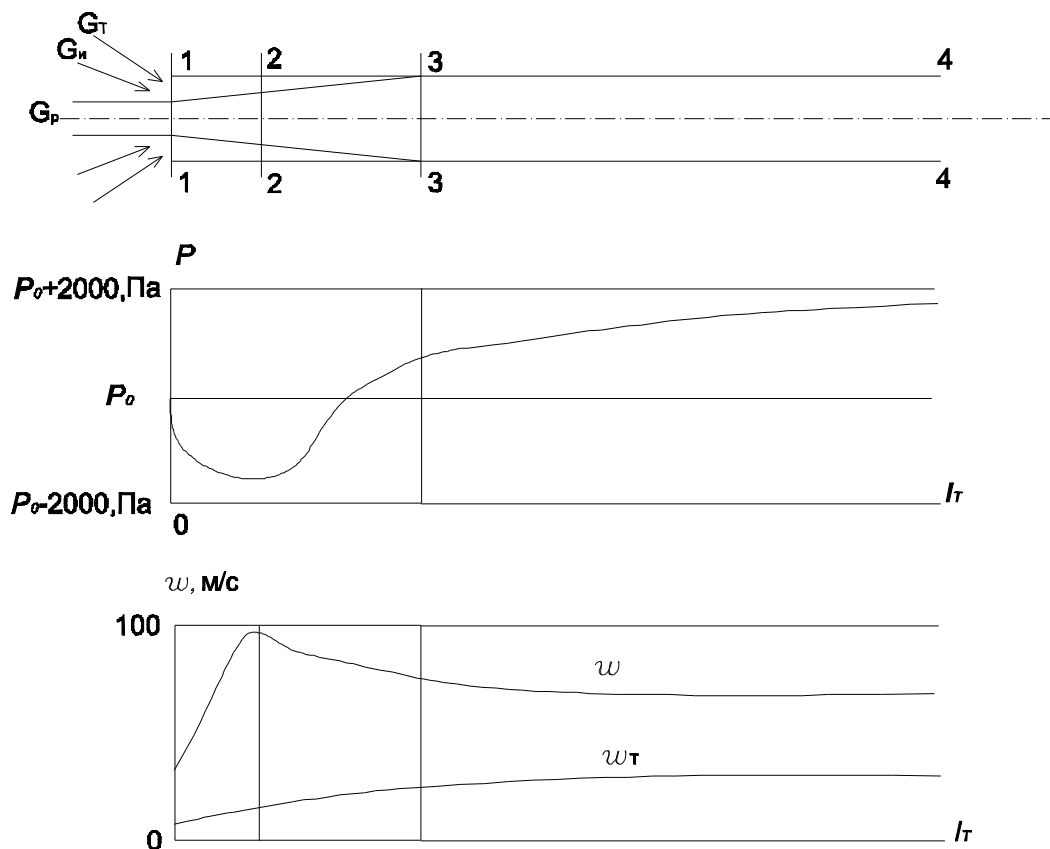


Рис. 6. Изменение статического давления и скорости фаз газоматериального потока вдоль разгонных трубок

Приведенные выше результаты расчетов хорошо согласуются с опытными данными [7] и могут быть использованы при гидравлическом расчете газоматериального тракта установки для пневматической механоактивации цемента в целом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 100431 Российская федерация, МПК51 В02С 19/06 Установка для пневматической механоактивации цемента [Текст] / Овчинников Д.А.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» - №2010125447/21; заявл. 21.06.10; опубл. 20.12.2010. БЮЛ.№35.

2. Акунов В.И. Струйные мельницы: учебник / В.И. Акунов. – М.: Изд-во Машиностроение, 1967. – 264с.

3. Стернин Л.И. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах: учебник / Л.И. Стернин –М.: Изд-во Машиностроение, 1978. – 284с.

4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй: учебник / Г.Н. Абрамович – М.: Изд-во Наука, 1984. – 284с.

5. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов: учебник / И.Е. Идельчик – М.: Изд-во Машиностроение, 1983.-351с.

6. Альтиуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник / А.Д. Альтиуль, П.Г. Киселев – М.: Изд-во Стройиздат, 1975. – 323с.

7. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению / В.И. Горобец, Л.Ж. Горобец – М.: Изд-во Недр, 1977. – 183с.