

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАМЕРНОГО НАСОСА

<sup>1</sup>Родионов Г.А., <sup>1</sup>Бухмиров В.В.

<sup>1</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия

---

**Состояние вопроса:** В настоящее время существует проблема высокой энергоемкости функционирования систем пневмотранспорта сыпучих материалов. Поэтому необходимо разработать математическую модель пневмотранспортной установки с целью выбора ее энергоэффективных режимных и конструктивных параметров. **Материалы и методы:** расчет движения двухфазного потока выполнен в программно-вычислительном комплексе Ansys Fluent. **Результаты:** предложена математическая модель движения двухфазных потоков мелкодисперсных материалов с учетом взаимодействия частиц, неравномерности заполнения материалопровода, теплообмена между фазами и турбулентности потока. **Выводы:** математическая модель может быть использована для расчетов движения двухфазных потоков в пневмокамерных насосах с учетом геометрических особенностей конструкции и свойств твердого материала в неподвижном состоянии.

---

Ключевые слова: пневмотранспорт, камерный насос, математическая модель, потери давления, энергоэффективность, новая конструкция.

## MATHEMATICAL MODELING PNEUMO PUMPS

<sup>1</sup>Rodionov G.A., <sup>1</sup>Bukhmirov V.V.

<sup>1</sup> Ivanovo State Power University, Ivanovo, Russia

---

**Background:** There is the problem of high energy systems functioning pneumatic bulk material need to develop a mathematical model of the pneumatic installation in order to select its energy-efficient operating and design parameters. **Need to develop a mathematical model of the pneumatic installation in order to select its energy-efficient operating and design parameters.** **Materials and Methods:** Computation of the two-phase flow is executed in software Ansys Fluent. **Results:** A mathematical model of the motion of two-phase flow of fine materials with regard to the interaction of particles, uneven filling Feeding pipeline, heat exchange between the phases and turbulence. **Conclusions:** The mathematical model can be used for the calculation of the motion in the two-phase currents in pneumo pumps based on geometric design features and properties of solid material in a stationary state.

---

Keywords: pneumatic, blow tank, the mathematical model of the pressure loss, energy efficiency.

Системы пневмотранспорта с камерными насосами (КН) являются одними из самых распространенных в России. Широкое применение таких типов насосов определяется их высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с другими системами пневмотранспорта [1, 2, 3, 5]. Однако из-за особенностей их конструкции применение камерных насосов связано с низкой энергоэффективностью.

На промышленных предприятиях также есть проблема применения систем пневмотранспорта с камерными насосами, которая заключается в «просадке» давления в сети воздухообеспечения при их работе. Поэтому существует необходимость разработки новых конструкций КН для решения вышеуказанных проблем.

Для разработки энергоэффективных режимов работы и конструкции камерных насосов применен метод математического моделирования. Математическое моделирование позволяет, без материальных затрат на натурные испытания, проверить влияние различных факторов на производительность КН (расход, давление, температура воздуха, конструкция и т.д.).

Математическая модель движения двухфазного потока основана на модели Эйлера [4] и состоит из системы дифференциальных уравнений:

– переноса импульса твердой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_s \rho_s w_{j,s}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma_s \rho_s w_{j,s} w_{i,s}) = -\gamma_s \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial P_s}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij,s}}{\partial x_j} + \gamma_s \rho_s g_i + K_{sf}(w_{i,f} - w_{i,s}); \quad (1)$$

– переноса импульса флюида

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f w_{j,f}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\gamma_f \rho_f w_{j,f} w_{i,f}) = -\gamma_f \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij,f}}{\partial x_j} + \gamma_f \rho_f g_i + K_{fs}(w_{i,s} - w_{i,f}); \quad (2)$$

– неразрывности для твердой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_s \rho_s) + \nabla(\gamma_s \rho_s w_s) = 0, \quad (3)$$

– неразрывности для флюида

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f) + \nabla(\gamma_f \rho_f w_f) = 0; \quad (4)$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_f \rho_f \alpha_f) + \nabla(\gamma_f \rho_f w_f \alpha_f) = -\gamma_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + \frac{\bar{\tau}_f}{\nabla w_f} - \nabla q_f + S_f + \alpha_{fs}(T_s - T_f)F; \quad (5)$$

где  $\tau_{ij,s}$  – тензор напряжений твердой фазы;  $\tau_{ij,f}$  – тензор напряжений флюида;  $P$  – давление;  $\gamma$  – относительная объемная концентрация;  $\rho$  – плотность;  $w$  – скорость;  $\delta$  – символ Кронекера;  $K_{fs}$  – коэффициент взаимодействия частиц твердой фазы с флюидом;  $q_f$  – тепловой поток;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $S$  – источниковый член;  $F$  – площадь поверхности твердой фазы, индексы  $s$  и  $f$  – твердая фаза и флюид соответственно.

Для описания турбулентных свойств двухфазного потока принята k-ε модель турбулентности.

Система дифференциальных уравнений (1) – (5) решена при помощи программно-вычислительного комплекса Ansys Fluent.

Целью математического моделирования работы камерного насоса «Монжус» была оценка влияния длины выходного патрубка насоса на потери давления и производительность камерного насоса. Так, уменьшение потерь давления приводит к уменьшению затрат на перемеще-

ние материала и, следовательно, приводит к уменьшению энергозатрат на привод компрессора.

Все расчеты были выполнены для следующих исходных данных:

- материал – цемент со средним размером частиц 15,5 мкм;
- расход воздуха 1,2 кг/с;
- уровень материала в насосе 1 м.

Конструкции камерного насоса приведены на рис. 1 и 2.

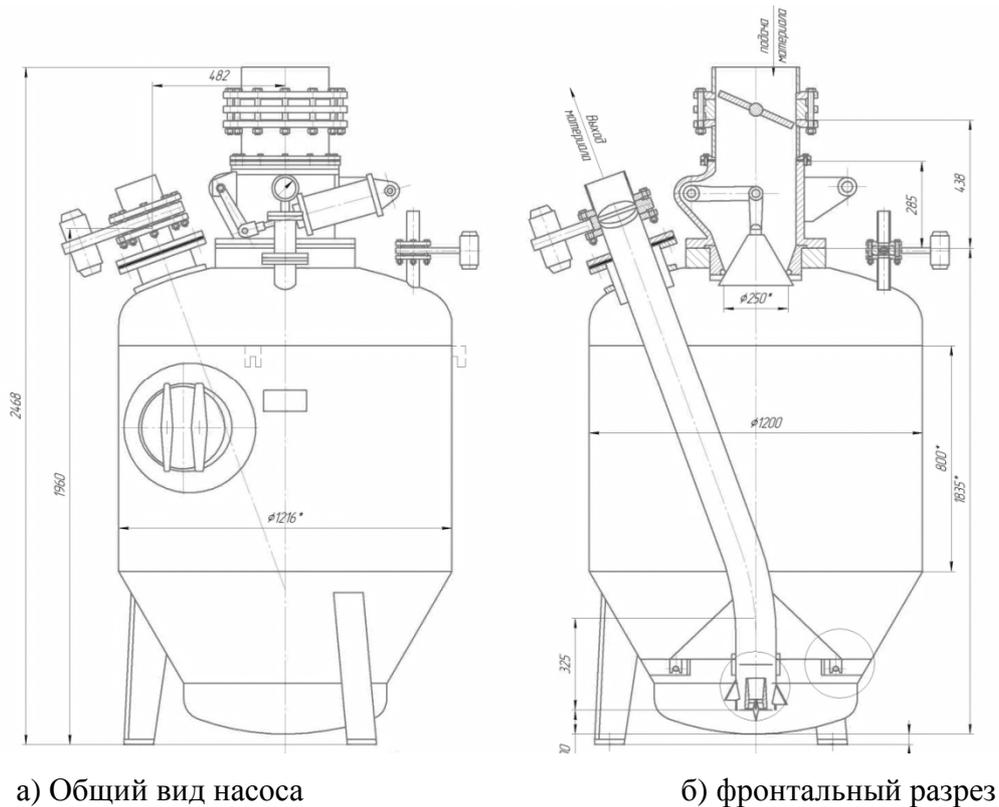
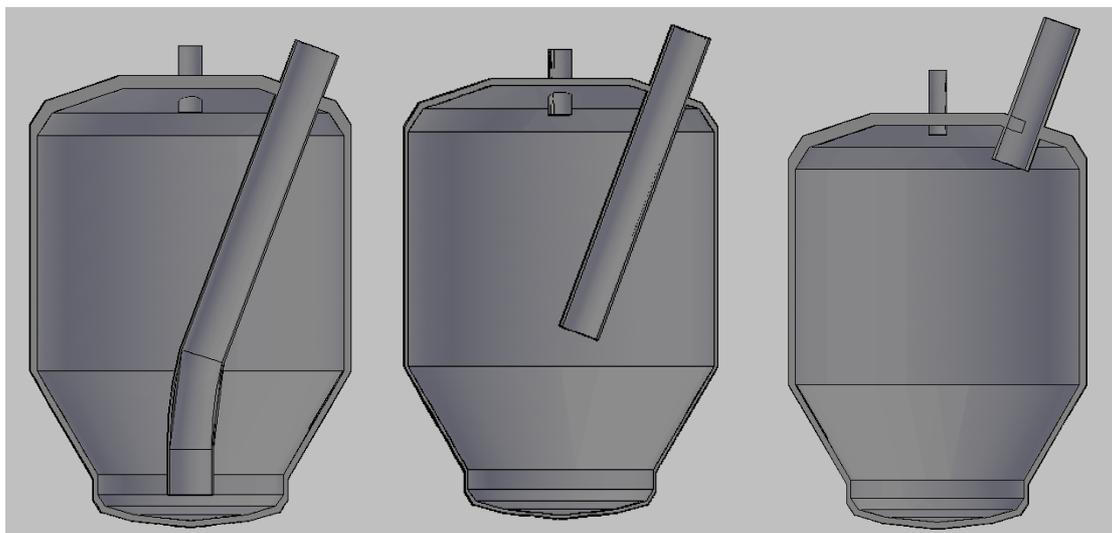


Рис. 1. Конструкция камерного насоса «Монжус»

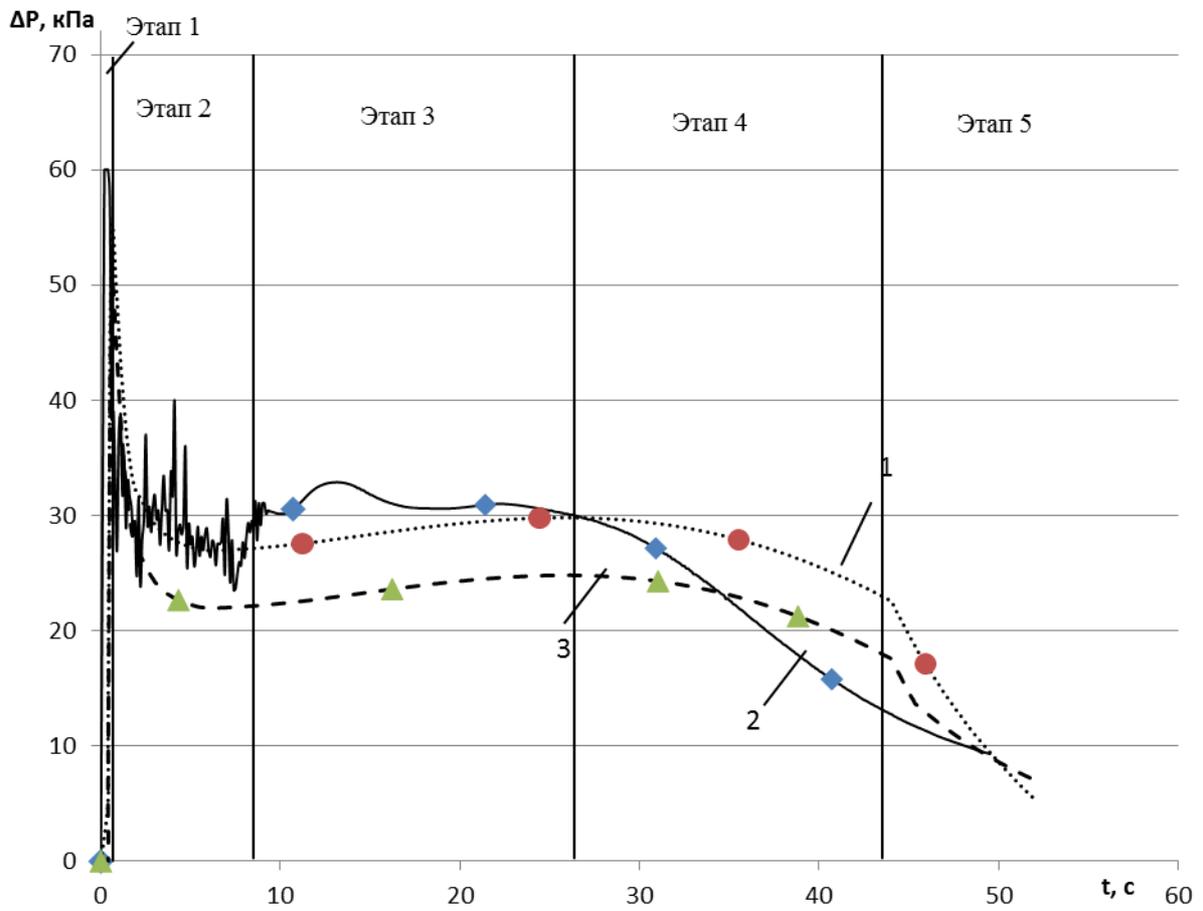


а)  $R=H$

б)  $R=2/3H$

в)  $R=0,1H$

Рис. 2. Конструкции камерных насосов для расчета (3D-разрез)



1 –  $R=H$ ; 2 –  $R=2/3H$ ; 3 –  $R=0,1H$

Рис. 3. Потери давления в камерном насосе

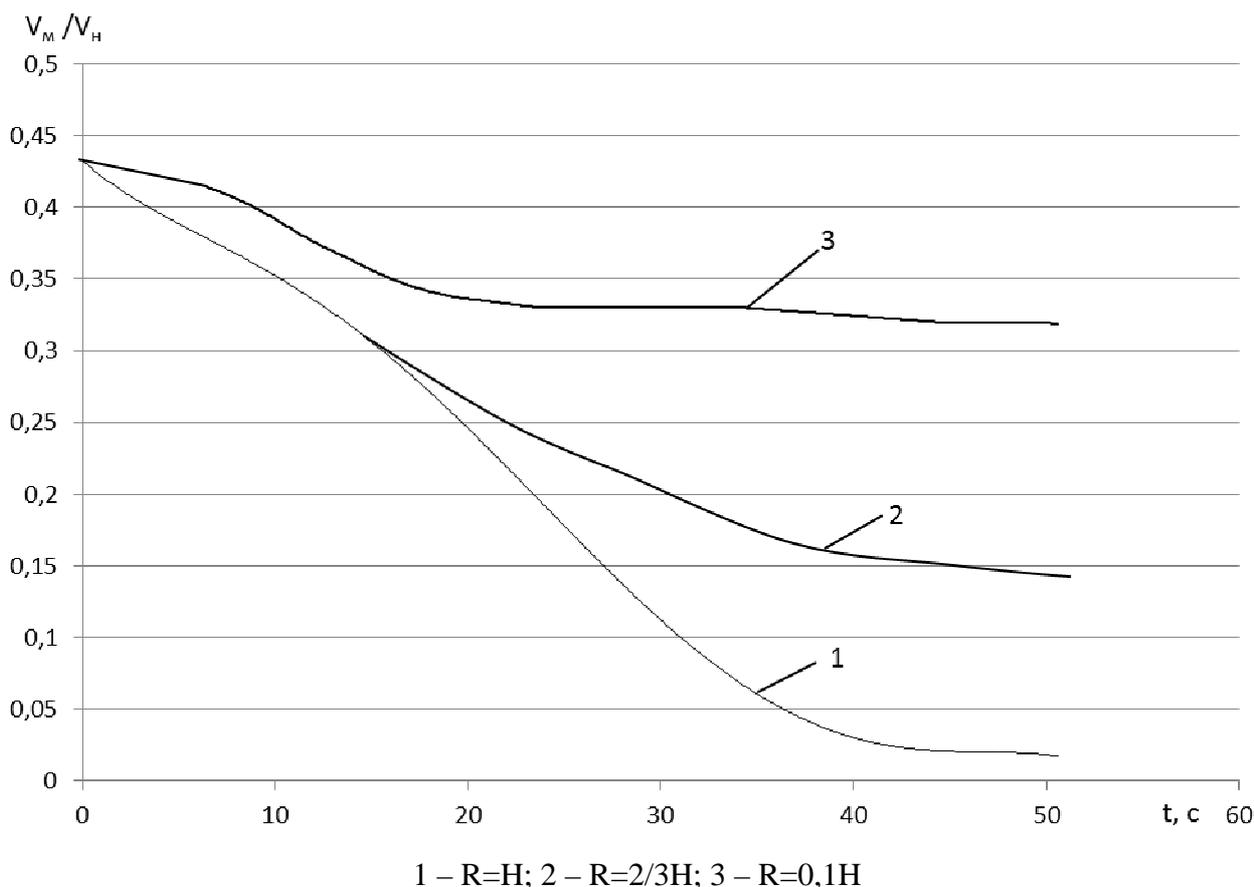


Рис. 4. Изменение объемной концентрации материала в камере насоса

В качестве параметров оптимизации были выбраны потери давления воздуха ( $\Delta P$ ) и удельный расход материала ( $V_m/V_n$ ). Результаты расчета приведены на рис. 3 и 4. Как видно при уменьшении длины патрубка уменьшаются потери давления в КН. Однако в этом случае скорость опорожнения камеры насоса уменьшается, а, следовательно, увеличивается остаток материала в камере и соответственно снижается производительность насоса.

Анализируя результаты расчета потерь давления (рис. 3), цикл разгрузки камерного насоса можно условно разделить на 5 этапов.

Этап 1. Наблюдается резкое увеличение потерь давления из-за затрат энергии потока воздуха на псевдооживление материала. Длительность этого процесса для различных конструкций КН равна 0,5–1 с.

Этап 2. На данном этапе работы КН начинается фильтрация воздуха через сыпучий материал, поэтому наблюдается снижение потерь давления. Отметим, что для конструкции насоса, изображенного на рис. 2 б, на этом этапе наблюдается нестабильность изменения потерь давления, что может привести к аварийному режиму его работы из-за возможного образования пробок материала. Длительность этапа находится в интервале 7–9 с.

Этап 3. На этом этапе наблюдается незначительный рост потерь давления (не более 5 кПа). Это происходит из-за роста скорости материала в выходном патрубке. Длительность этапа ~20 с.

Этап 4. На четвертом этапе потери давления начинают уменьшаться. Это связано с уменьшением объемной концентрации в выходном патрубке КН. Длительность этапа ~15 с.

Этап 5. На этом этапе разгрузка КН практически прекращается, что приводит к еще более быстрому уменьшению потерь давления. Длительность этапа ~10 с.

Анализируя данные расчета, можно сделать вывод о том, что наименьшие потери давления у конструкции КН, изображённом на рис. 2 в, но в этом случае в камере насоса остается более 73 % материала.

Конструкция КН рис. 2 б по сравнению с конструкцией рис. 2 а тоже работает с меньшими потерями давления, и по окончании процесса в камере насоса остается менее 30 % материала. Однако следует отметить, что потери давления в начальный момент времени выше на 10 %, а также наблюдается нестабильность на начальном этапе работы. Это может привести к образованию пробки в материалопроводе и как следствие к аварийному режиму работы КН. Результаты расчета потерь давления соответствуют показаниям штатных приборов, установленных на ОАО «Бонолит строительные системы» (г. Старая Купавна) и ОАО «ЭКО» (г. Ярославль).

#### Выводы

1. Разработана математическая модель пневмотранспорта сыпучих материалов, учитывающая размеры частиц, сжимаемость газа, взаимодействие частиц друг с другом, с газом и стенкам материалопровода.
2. С уменьшением длины патрубка уменьшаются потери давления, но в этом случае наблюдается увеличение количества остатка материала в камере. Следовательно, уменьшение длины патрубка КН не целесообразно.
3. Разработанная математическая модель движения двухфазных потоков позволяет исследовать режимы работы камерных насосов не только с верхней разгрузкой материала, но и других конструкций камерных насосов.

#### Список литературы

1. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Сравнительный анализ систем пневмотранспорта. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Состояния и пер-

спективы развития электротехнологий» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2013. Т. 2. С. 150-153.

2. Левич В.Г., Мясников В.П. Кинетическая теория псевдооживленного состояния // Хим. пром. – 1966. – № 6. – С. 404-408.

3. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов. – М.: Химия, 1972. 238 с.

4. ANSYS FLUENT User's Guide. Software Release Version 14. 2011. – 2498 p.

5. Siegel W. Entwicklungsstand der pneumatischen Förderung. Die Mühle + Mischfuttertechnik. Kongressband, 1977. P. 291-296.

#### **Рецензенты:**

Авдюнин Е.Г., д.т.н., профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ИГЭУ, Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново.

Бушуев Е.Н., д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново.