

УДК 631.331.022

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ АЭРОПРОДУКТОВОГО ПОТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ

Кравцов Артем Витальевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: artem-kravtsov-penzgtu@yandex.ru

Коновалов Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

Зайцев Владимир Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: vluzai@gmail.com

Донцова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: dontmv@mail.ru

Ключевые слова: сеялка, поток, распределитель, трубопровод, пневмосистема, моделирование.

Цель исследований – снижение потерь давления в пневмосистеме сеялки с пневматическим высевом. При производстве сеялок с пневматическим высевом одним из качественных показателей технологического процесса пневмотранспортирования семян растений и гранул минеральных удобрений является равномерность распределения транспортируемого сыпучего материала от бункеров с дозатором высевающего аппарата до выгрузных устройств – сопел сошников. Задачу по распределению материала по сошникам решает распределитель. При наличии поперечной неравномерности подачи семян около 10% имеется угроза снижения урожайности пшеницы до 1,0...1,5 ц/га. Для обеспечения качества указанного распределения материала в конструкции сеялки требуется обеспечить ряд количественных условий. Изменение скоростного режима движения частиц сыпучего материала влияет не только на качественные показатели его распределения по сошникам, но и на пневматическое сопротивление пневмоконвейера в силу турбулентности потока, и на потребляемую мощность привода вентилятора. Приведены уравнения потери напора пневмосистемы. Представлены результаты анализа 3D модели пневмосистемы сеялки по давлению и скорости потока. При моделировании изменялась скорость потока в начале горизонтального участка трубопровода и концентрация высеваемого материала в аэропродуктовом потоке. Скорость потока изменялась в интервале 15-25 м/с. Концентрация материала изменялась в интервале 0-1,27 кг/кг воздуха. Получены уравнения регрессии средней скорости потока по сечениям пневмосистемы, падения статического и полного давления. Рекомендовано осуществление совершенствования конструкции пневмосистемы сеялок. Имеющаяся гофрированная поверхность трубопровода в полном объеме не справляется с возложенной задачей. Конструкция вертикального трубопровода требует наличия дополнительных элементов конструкции, центрирующих поток, как по длине данного трубопровода, так и на входе в распределитель.

THE SPEED MODE OF AEROPRODUCT FLOW WITH PARALLEL-SEQUENTIAL SECTIONS

A. V. Kravtsov, Post-Graduate Student of the Department «Engineering Technology», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, Baydukova travel/Gagarin street, 1A /11.

E-mail: artem-kravtsov-penzgtu@yandex.ru

V. V. Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Engineering Technology», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, Baydukova travel/Gagarin street, 1A /11.

E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

V. Yu. Zaytsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Engineering Technology», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, Baydukova travel/Gagarina street, 1A /11.

E-mail: vluzai@gmail.com

M. V. Dontsova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Engineering Technology», FSBEI HE Penza State Technological University.

440039, Penza, Baydukova travel/Gagarin street, 1A /11.

E-mail: dontmv@mail.ru

Key words: seeder, flow, distributor, pipe, pneumatic system, simulation.

The aim of the research is to reduce pressure losses in the pneumatic system of the seeder with pneumatic sowing. In the production of seeders with pneumatic sowing one of the qualitative indicators of the technological process of pneumatic transportation of plant seeds and granules of oral fertilizers is the uniformity of the distribution of transported bulk material from the bins with the dispenser of the sowing device to the unloading devices – nozzles of coulters. The task of distributing the material on the coulters is solved by the distributor. In the presence of transverse non-uniformity of feed of seeds is about 10% there is a risk of reducing productive activity of wheat to 1.0...1.5 t/ha. To ensure the quality of the specified material distribution in the design of the seeder is required to provide a number of quantitative terms. The change in the speed mode of movement of particles of bulk material affects not only the qualitative indicators of its distribution on coulters, but also the pneumatic resistance of the pneumatic conveyor due to the turbulence of the flow, and the power consumption of the fan drive. Equations of pressure loss of pneumatic system are given. The results of the analysis of the 3D model pneumatic seeder pressure and flow rate. The flow rate at the beginning of the horizontal section of the pipe and the concentration of the sown material in the air product flow were changed in the simulation. The flow rate varied in the range of 15-25 m/s. The material concentration varied in the range of 0-1.27 kg/kg of air. The regression equations of the average flow velocity over the sections of the pneumatic system, the fall of the static and total pressure are obtained. It is recommended to improve the design of the pneumatic system of seeders. The existing corrugated surface of the pipe does not fully cope with the task. The design of the vertical pipe requires additional structural elements that center the flow, both along the length of the pipe and at the inlet to the distributor.

При производстве изделий в машиностроении необходимо комплексное решение двух основных задач. С одной стороны, проектируемое или изготавливаемое изделие должно быть высокотехнологичным объектом, требующим минимальных затрат труда, материала и энергии на его изготовление. С другой стороны, необходимо обеспечивать технические условия работоспособности изделия по его служебному назначению.

Как правило, производитель и покупатель в этом случае представляют «враждующие стороны». Первый пытается производить низкозатратную продукцию, но продавать ее по более высокой цене. Второй стремится приобрести изделие по минимально допустимой цене, но при этом качество и производительность не должны «страдать».

Поэтому требуется проводить оптимизацию технологического процесса изготовления изделия по минимальным критериям энерго-, материало- и трудозатрат. При этом должна быть обеспечена работоспособность изделия по количественным, качественным и мощностным показателям. В случае несоответствия производительности, потребляемой мощности и качественных показателей изделия технологическим потребностям осуществляемого процесса, потребитель – покупатель, как правило, отказывается от приобретения «подобных» изделий.

Тем самым, при наличии разнообразия аналогичных по назначению изделий, потребитель выбирает продукцию машиностроения из технических условий ее эксплуатации и соотношения цена – качество. Указанные противоречия служат двигателем технического прогресса. Подобный подход акцентирует внимание на потребности совершенствования технологического процесса осуществляемого изделием по качественным показателям. И лишь при удовлетворении выше указанных критериев выполнения рабочего процесса изделием возникает целесообразность удешевления его производства. Отсутствие учета указанных условий конкуренции является фактором проигрыша отечественной продукции зарубежным аналогам.

При производстве изделий – сеялок с пневматическим высевом – одним из качественных показателей технологического процесса пневмотранспортирования семян растений и гранул

минеральных удобрений является равномерность распределения транспортируемого сыпучего материала от бункеров с дозатором высевяющего аппарата до выгрузных устройств – сопел сошников

[1, 2, 3]. Указанную задачу по распределению материала по сошникам решает распределитель [4, 5]. Согласно авторам [6] при наличии поперечной неравномерности подачи семян около 10% имеется угроза снижения урожайности пшеницы до 1,0...1,5 ц/га.

Для обеспечения качества указанного распределения материала в конструкции сеялки требуется обеспечить ряд количественных условий: подача материала – по норме высева на единицу площади поля; скорость воздуха – по условию транспортирования (для горизонтальных участков – 1,1 скорости витания частиц материала; для вертикальных участков – 1,5...2,0 скорости витания [7]), по условию вхождения в распределитель – в зависимости от конструкции распределителя [8]. Имеются рекомендации [9] по указанной скорости, так для пшеницы она составляет 24...28 м/с, для рапса – 20...24 м/с. При этом, начиная от 6...8 м/с при лобовом ударе возможно повреждение семян [8].

Изменение скоростного режима движения частиц сыпучего материала влияет не только на качественные показатели его распределения по сошникам, но и на пневматическое сопротивление пневмоконвейера в силу турбулентности потока, и на потребляемую мощность привода вентилятора [12].

Цель исследований – снижение потерь давления в пневмосистеме сеялки с пневматическим высевом.

Задачи исследований – создать 3D модель пневмосистемы сеялки и провести численные исследования движения аэропродуктового потока при изменении скорости потока и концентрации высевяемого материала в воздушном потоке; установить функциональные зависимости влияния скоростного режима движения аэропродуктового потока на потери давления с помощью численного анализа методом конечных объемов 3D моделей сеялки.

Методика исследований. Методика исследований предусматривала получение 3D модели ветви пневмотранспортной системы с одним распределителем 7 (рис. 1), проведение численных исследований по определению показателей скорости и давления от движения потока при изменении скорости аэропродуктового потока после эжектора 3 для подвода сыпучего материала в воздушный поток. На основании полученных сведений определены регрессионные зависимости взаимосвязи указанных показателей, уточнены коэффициенты изменения скоростного режима. При моделировании принято допущение, что скорость потока по поперечному сечению начала горизонтального участка 2 постоянна и равна ϑ . Указанное условие устраняет возможное несовершенство эжектора 3 по влиянию на характер движения потока. То есть, рассматривается случай идеальной подачи потока по равномерности.

Особенностью конструкции пневмосистемы сеялки является использование после поворотного колена 5 вертикального трубопровода 6 для торцевого верхнего размещения распределителя 7 (рис. 1). Подобные конструкции пневмосистем применяются в различных сеялках с пневматическим высевом, в т.ч. в изделиях таких компаний как «Kuhn» (ООО «Кун восток»), «Vaderstad» (ООО «Вадерштад»), включая отечественного производителя – АО «Радиозавод».

Скорость аэропродуктового потока после эжектора 3 при моделировании изменялась в интервале $\vartheta = \vartheta_1 = 15 \dots 25$ м/с, концентрация материала относительно воздуха принимает значения – $\mu = 0 \dots 1,57$ (0; 0,52; 1,04; 1,57) кг/кг.

Результаты исследований. Движение потока в трубопроводе описывается уравнением Бернулли. На его основании [10, 11] потери давления для рассматриваемого i -го участка трубопровода записываются, Па:

$$\Delta P_i = \rho_B \cdot (1 + \mu) \cdot \left(\frac{K_p}{2} \cdot (\Delta v)^2 + \left(\xi_i + \frac{\lambda_i L_i}{D_i} \right) \cdot \frac{\rho_B v^3}{2g} + g \cdot h \right), \quad (1)$$

где ρ_{B_i} – плотность воздуха на i -м участке, кг/м³; μ – концентрация материала относительно воздуха, кг/кг; K_p – коэффициент сопротивления разгонного участка; ξ_i – коэффициент местного сопротивления трубопровода на i -м участке; λ_i – коэффициент сопротивления потока по длине трубопровода; L_i – длина участка трубопровода, м; D_i – диаметр участка трубопровода, м; g –

ускорение свободного падения, m/c^2 , h – перепад высот трубопровода на i -м участке, м; v , Δv – скорость, изменение скорости потока на i -м участке, м/с; k – эмпирический коэффициент снижения скорости частиц материала относительно скорости воздуха, 0,75...0,93 [7].

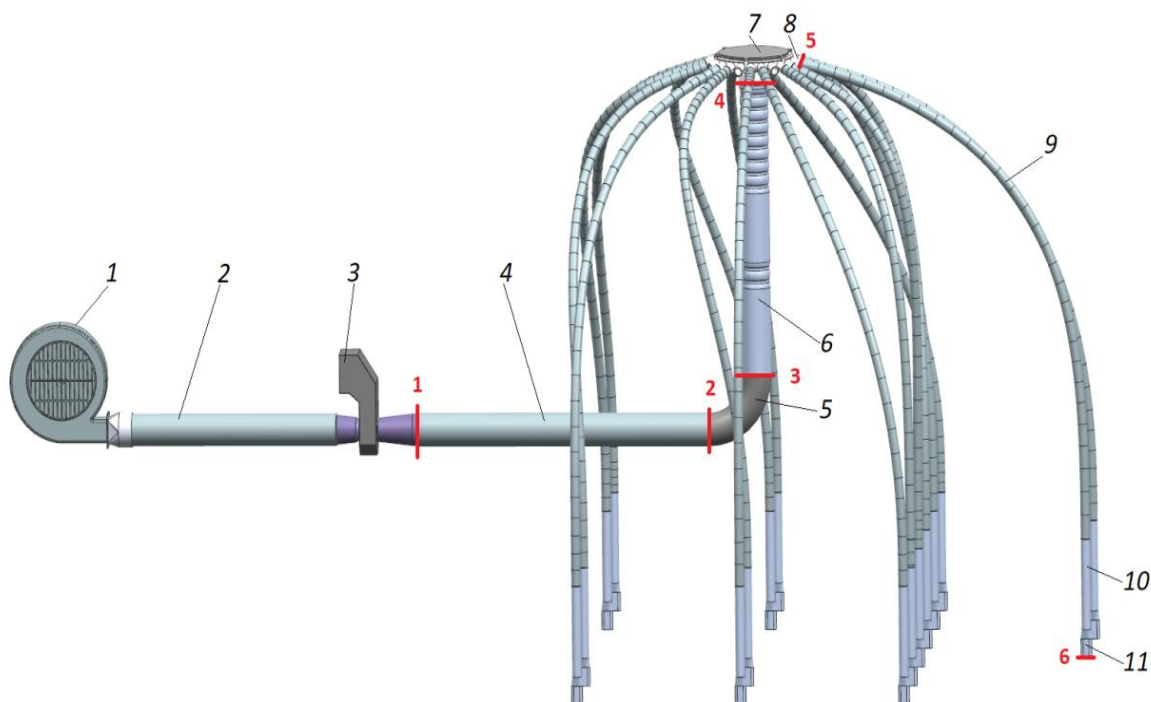


Рис. 1. Пневмосистема сеялки с пневматическим высевом:

- 1 – вентилятор; 2 – воздуховод; 3 – эжектор для внесения высеваемого материала; 4 – горизонтальный трубопровод; 5 – колено; 6 – вертикальный трубопровод; 7 – распределитель; 8 – патрубок распределителя; 9 – семяпровод в виде гибкого шланга; 10 – сошник; 11 – сопло сошника

Учитывая различие скоростного режима движения воздуха и частиц сыпучего материала, можно записать потери давления для рассматриваемого i -го участка трубопровода по составляющим потока, Па:

$$\Delta P_i = \rho_{Bi} \cdot \left(\frac{K_p}{2} \cdot (\Delta v)^2 + \left(\xi_i + \frac{\lambda_i \cdot L_i}{D_i} \right) \cdot \frac{(v)^2}{2g} + g \cdot h \right) + \rho_{Bi} \cdot \mu \cdot \left(\frac{K_p}{2} \cdot (k \cdot \Delta v)^2 + \left(\xi_i + \frac{\lambda_i \cdot L_i}{D_i} \right) \cdot \frac{k \cdot (v)^2}{2g} + g \cdot h \right). \quad (2)$$

При этом скорость потока v_i изменяется относительно исходного значения v_i^0 при адиабатном процессе:

$$v_i = v_i^0 \cdot \left(\frac{p_i^0}{p_i} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); p_i , p_i^0 – давление воздуха на i -м участке до и после уточнения скорости потока, Па.

Расчетная плотность аэропродуктового потока [11] по i -м сечениям трубопровода, kg/m^3 :

$$\rho_{Ci} = \rho_{Bi} \cdot (1 + \mu). \quad (4)$$

Анализ выражений (2) и (3) позволяет сделать вывод, что потери давления на участках пневмотранспорта пропорциональны скорости движения потока, изменению скорости потока на участке и высоте подъема потока на участке, а также пропорциональны подаче (концентрации материала относительно воздуха) сыпучего материала.

Результаты моделирования движения аэропродуктового потока на интервале от начала горизонтального трубопровода до сопел сошников для изменения скорости представлены на рисунке 2, для полного давления – на рисунке 3. Характер изменения скорости в целом сохраняется, как и у давления. Однако существенно изменяются числовые значения.

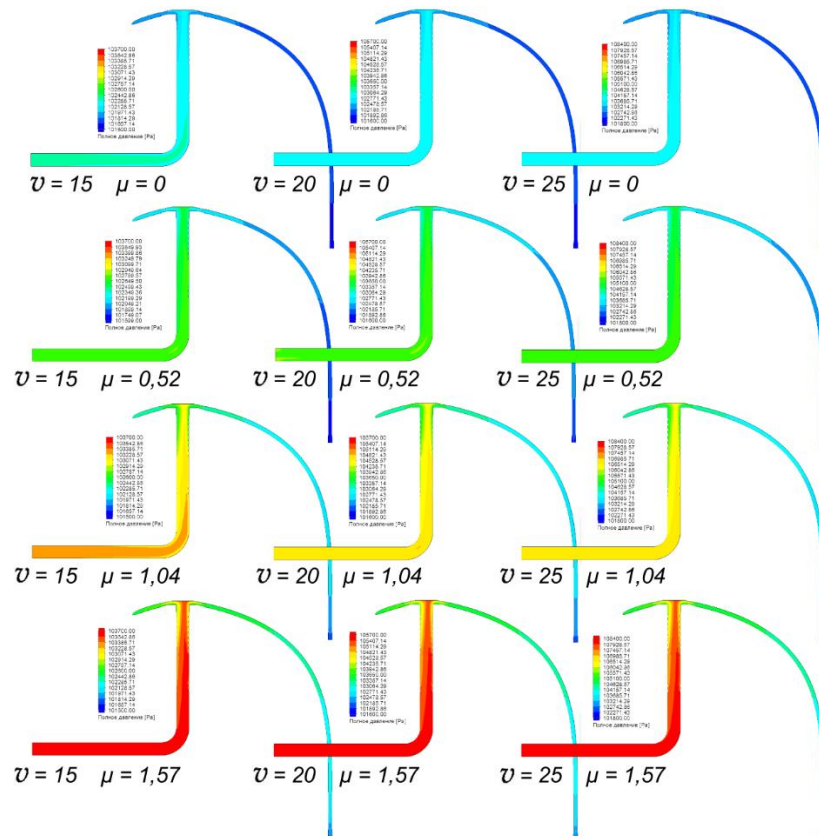


Рис. 2. Результаты 3D моделирования полного давления аэропродуктового потока сеялки в зависимости от скорости потока на входе в горизонтальный трубопровод $v = V$ (м/с) и концентрации материала μ (кг/кг)

Падение статического давления для интервала между соответствующими сечениями описывается выражениями, Па:

$$\begin{aligned} \Delta P_{s_{12}} &= 0,5552 \cdot (83,51488 \cdot \mu^{0,971577} + 0,008438 \cdot v^{3,109249}); R = 0,96585; \\ \Delta P_{s_{23}} &= 0,28881 \cdot (54,41179 \cdot \mu^{0,712183} + 0,081824 \cdot v^{2,302262}); R = 0,97752; \\ \Delta P_{s_{34}} &= 8,711954 \cdot (38,47593 \cdot \mu^{1,06644} + 0,000941 \cdot v^{3,51895}); R = 0,96528; \\ \Delta P_{s_{45}} &= 1,155562 \cdot (372,9037 \cdot \mu^{1,069232} + 0,004566 \cdot v^{3,737374}); R = 0,96276; \\ \Delta P_{s_{56}} &= 1,162248 \cdot (425,4388 \cdot \mu^{1,063592} + 0,008369 \cdot v^{3,617653}); R = 0,96320, \end{aligned} \quad (5)$$

где μ – концентрация материала относительно воздуха, кг/кг; v – скорость потока на начало горизонтального участка (в первом сечении), м/с; R – коэффициент корреляции результатов моделирования и расчетных значений по уравнению регрессии.

Падение полного давления на участках, Па:

$$\begin{aligned} \Delta P_{p_{12}} &= 0,522823 \cdot (93,8715 \cdot \mu^{0,986845} + 0,007797 \cdot v^{3,174643}); R = 0,97209; \\ \Delta P_{p_{23}} &= 0,573886 \cdot (38,53097 \cdot \mu^{0,960671} + 0,01024 \cdot v^{2,790959}); R = 0,97379; \\ \Delta P_{p_{34}} &= 1,818319 \cdot (197,8476 \cdot \mu^{1,055608} + 0,00463 \cdot v^{3,532687}); R = 0,96570; \\ \Delta P_{p_{45}} &= 1,080949 \cdot (298,6461 \cdot \mu^{1,071847} + 0,003531 \cdot v^{3,749444}); R = 0,96220; \\ \Delta P_{p_{56}} &= 2,959883 \cdot (228,7456 \cdot \mu^{1,075889} + 0,003376 \cdot v^{3,699263}); R = 0,96191; \\ \Delta P_{p_{6at}} &= 2,937926 \cdot (3,333012 \cdot \mu^{0,991296} + 3,300401 \cdot v^{-6,5E-07}); R = 1,0000. \end{aligned} \quad (6)$$

Средняя скорость потока по сечениям, м/с:

$$\begin{aligned} v_2 &= v - 0,0245 \cdot v + 0,019252 \cdot \mu; R = 0,99978; \\ v_3 &= v - 0,00491 \cdot v + 0,079515 \cdot \mu; R = 0,99988; \\ v_4 &= v - 0,0022 \cdot v + 0,044376 \cdot \mu; R = 0,99993; \\ v_5 &= v - 0,20105 \cdot v + 0,068319 \cdot \mu; R = 0,99957; \\ v_6 &= v + 0,193491 \cdot v + 0,220914 \cdot \mu; R = 0,99829. \end{aligned} \quad (7)$$

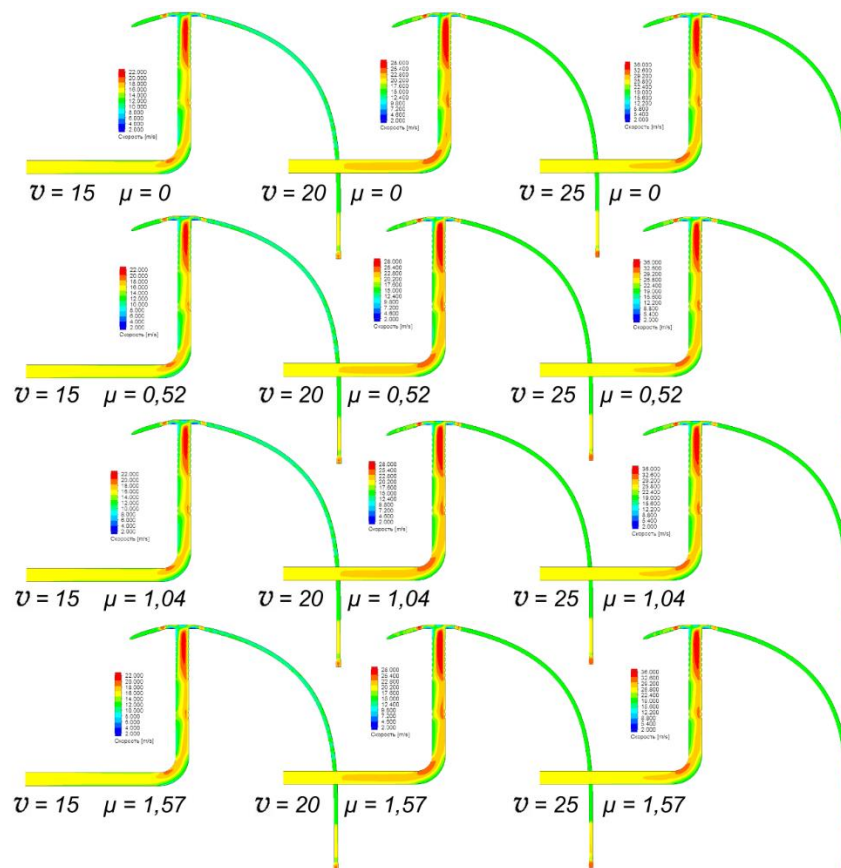


Рис. 3. Результаты 3D моделирования скоростного режима движения агропродуктового потока сеялки в зависимости от скорости потока на входе в горизонтальный трубопровод $v = V$ (м/с) и концентрации материала μ (кг/кг)

Примеры графиков полученных уравнений регрессии представлены на рисунках 4, 5. Падение статического давления на интервале сечений 4-5 представлено на рисунке 4, а, падение динамического давления после сечения 6 – атмосфера – показано на рисунке 4, б, средняя скорость потока в сечении 3 изображена на рисунке 5.

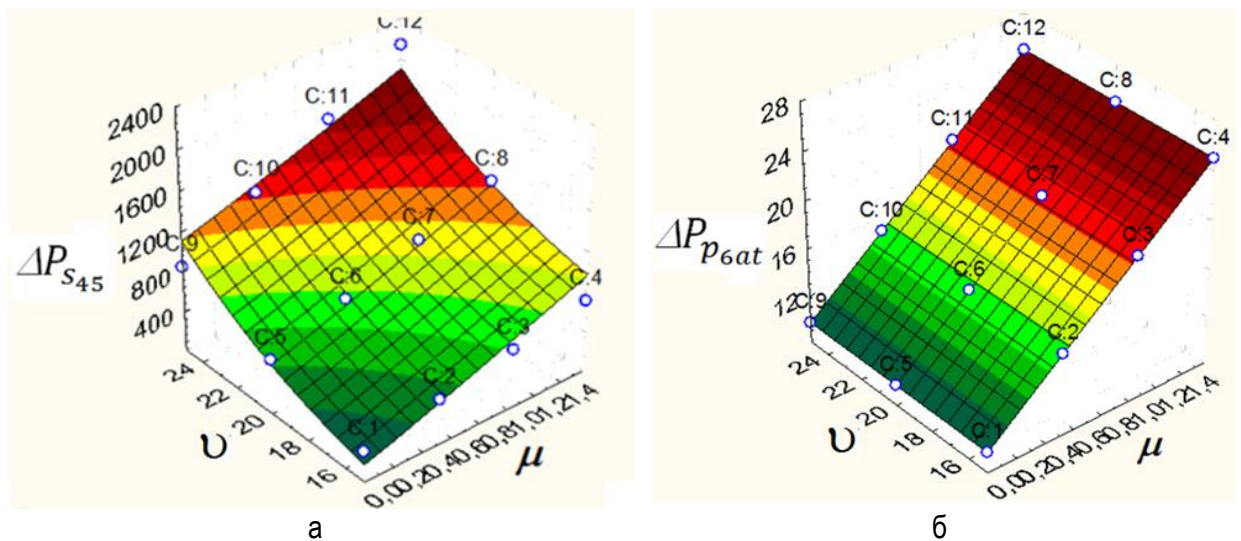


Рис. 4. Влияние средней скорости потока v (м/с) на входе в горизонтальный трубопровод и концентрации высеваемого материала μ (кг/кг):
 а – на падение статического давления потока на интервале сечений 4-5 (Па); б – на падение динамического давления после сечения 6 при выходе потока в атмосферу (Па)

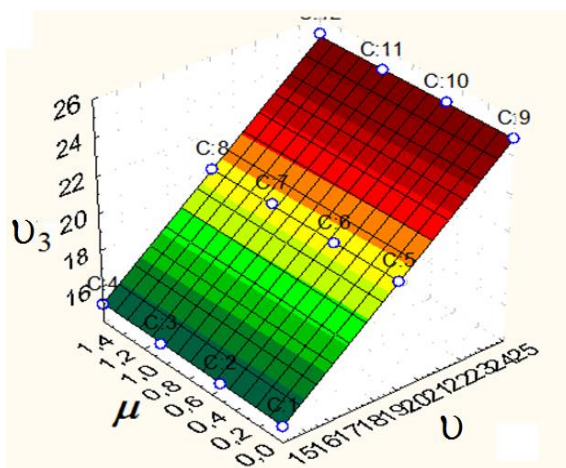


Рис. 5. Влияние средней скорости потока U (м/с) на входе в горизонтальный трубопровод и концентрации высеваемого материала μ (кг/кг) на среднюю скорость потока U_3 (м/с) в сечении 3 (на начало вертикального участка)

При изменении скорости входа потока и концентрации материала в потоке (рис. 2, 3) характер изменения скоростного режима движения струй потока существенно не отличается. Изменяются лишь абсолютные числовые значения. Наблюдается появление тенденций стержневого движения потока в середине – конце горизонтального трубопровода, выраженные в виде полутонов скоростного режима. С ростом концентрации материала в потоке существенно увеличиваются потери давления. Рост скорости потока увеличивает динамические потери давления.

Анализ графического материала (рис. 2, 3) движения аэропродуктового потока сеялки свидетельствует, что на колене 5 (рис. 1) наблюдается смещение частиц высеваемого материала к наружной поверхности колена. После выхода потока из колена, на вертикальном участке трубопровода 6 несимметричность скоростного потока относительно продольной оси трубопровода сохраняется. Движение потока относительно правой стенки вертикального трубопровода 6 более интенсивно. Наличие гофрированной поверхности трубопровода турбулизирует поток, способствуя выравниванию концентрации частиц по поперечному сечению вертикального трубопровода [13]. Однако, при моделировании вдоль левой стенки вертикального трубопровода (рис. 2, 3) сохраняются слои потока с существенно меньшей его энергией (как по скорости, так и динамическому давлению), что подтверждается линиями тока струй потока (рис. 6). Это неизбежно повлияет на количество высеваемого материала, поступающего к разным сошникам 10, увеличивая неравномерность поперечного высева.

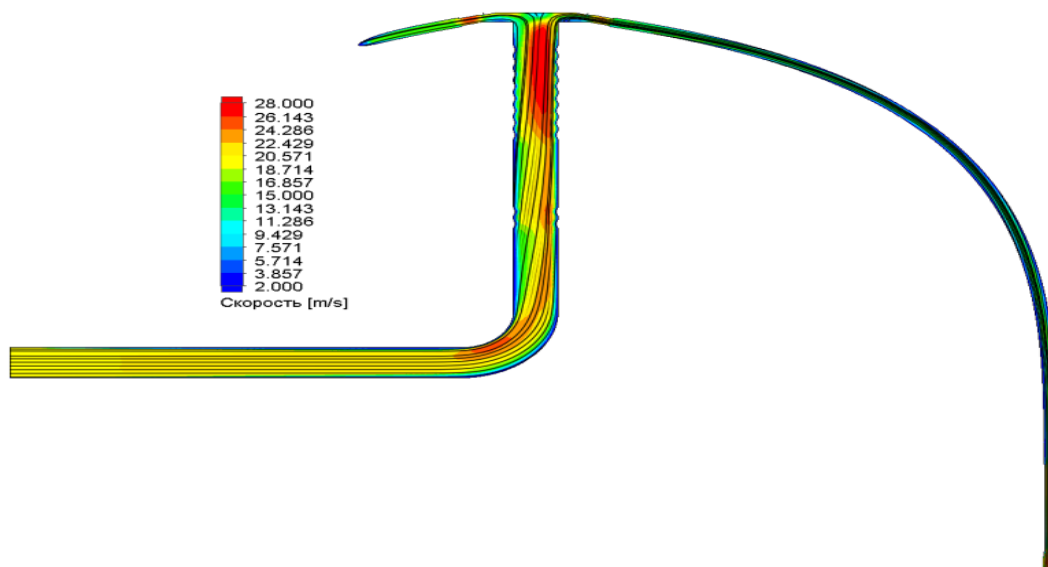


Рис. 6. Линии тока струй аэропродуктового потока пневмосистемы сеялки

Таким образом, существующая конструкция сеялок с пневматическим высевом требует дополнительной модернизации, направленной, в том числе, на выравнивание концентрации высеваемого материала относительно продольной оси вертикального трубопровода. Имеющаяся гофрированная поверхность трубопровода не справляется с возложенной задачей. Имеются рекомендации [13] по увеличению радиуса изгиба колена и повышению высоты размещения распределителя. Подобные изменения могут существенно улучшить числовые показатели неравномерности поперечного высева, однако не способны кардинально изменить несимметричность аэропродуктового потока относительно продольной оси вертикального трубопровода. Тем самым, конструкция вертикального трубопровода требует наличия дополнительных элементов конструкции [5, 9], в том числе центрирующих поток как по длине данного трубопровода, так и (в особенности) на входе в распределитель.

Заключение. Падение давления на интервалах длины трубопровода описывается выражениями степенного типа, а средние скорости потока в сечениях описываются полиномом первого порядка относительно средней скорости потока на входе в трубопровод и концентрации высеваемого материала относительно воздуха. При изменении скорости входа потока и концентрации материала в потоке характер изменения скоростного режима существенно не отличается. Изменяются лишь числовые значения скорости отдельных струй потока. Наблюдается появление тенденций стержневого движения потока в середине – конце горизонтального трубопровода. С ростом концентрации материала в потоке существенно увеличиваются потери давления. Рост скорости потока увеличивает динамические потери давления.

Существующая конструкция сеялок с пневматическим высевом требует дополнительной модернизации, направленной, в том числе на центрирование аэропродуктового потока относительно продольной оси вертикального трубопровода. Имеющаяся гофрированная поверхность трубопровода в полном объеме не справляется с возложенной задачей. Конструкция вертикального трубопровода требует наличия дополнительных элементов конструкции, центрирующих поток как по длине данного трубопровода, так и (в особенности) на входе в распределитель.

Библиографический список

1. Петров, А. М. Разработка универсальной пневматической сеялки для зерновых, мелкосемянных и трудновысеваемых культур / А. М. Петров, Н. П. Крючин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 3-7.
2. Ларюшин, Н. П. Результаты лабораторных исследований сошника с подпружиненным распределителем и копирующим устройством дна борозды / Н. П. Ларюшин, А. В. Мачнев // Научное обозрение. – 2015. – № 17. – С. 33-39.
3. Мачнев, А. В. Результаты лабораторных исследований высевающего аппарата с несимметричным профилем желобков катушки / А. В. Мачнев, В. А. Мачнев, П. Н. Хорев, А. Н. Хорев // Нива Поволжья. – 2014. – № 2 (31). – С. 76-84.
4. Мачнева, О. Ю. Исследование взаимодействия семян с распределяющим и отражающим устройствами / О. Ю. Мачнева, В. С. Каблуков, О. Н. Кухарев [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2018. – № 4 (40). – С. 111-117.
5. Рахимов, З. С. Обоснование параметров пневматической системы транспортирования семян и удобрений почвообрабатывающего посевного агрегата / З. С. Рахимов, Н. Т. Хлызов, И. Р. Рахимов [и др.] // АПК России. – 2017. – Т. 24, № 1. – С. 91-104.
6. Змиевский, В. Т. Влияние различий в высеве отдельными аппаратами на урожайность / В. Т. Змиевский, Н. Н. Домина, Л. Б. Казаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 5. – С. 40-41.
7. Мударисов, С. Г. Обоснование параметров двухфазного течения «воздух –семена» при математическом описании работы пневматической системы зерновой сеялки / С. Г. Мударисов, З. С. Рахимов // Вестник Башкирского ГАУ. – 2014. – № 4. – С. 85-91.
8. Крючин, Н. П. Повышение эффективности распределительно-транспортирующих систем пневматических посевных машин : монография. – Самара : РИЦ СГСХА, 2008. – 176 с.
9. Пятаев, М. В. Моделирование параметров турбулизатора пневматического распределителя семян / М. В. Пятаев // Вестник Челябинской ГАА. – 2013. – Т. 65. – С. 50-55.
10. Давыдов, С. Я. Расчет пневмотранспорта штучных грузов // Теория и практика мировой науки. – 2016. – №2. – С. 54-59.

11. Кантаев, А. С. Расчет установок пневмотранспорта / А. С. Кантаев, И. Д. Брус, Н. С. Тураев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 28 с.
12. Lei, X. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat / X. Lei [et al.] // *Computers and electronics in agriculture*. – 2018. – Vol. 150. – P. 98-109.
13. Lei, X. Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat / X. Lei [et al.] // *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. – 2017. – №. 3. – P. 7.

References

1. Petrov, A. M., & Kryuchin, N. P. (2014). Razrabotka universalnoi pnevmaticheskoi seyalki dlia zernovykh, melkosemiannykh i trudnovysevaemykh kultur [Design of universal pneumatic drill for grain, small seeds and difficultly sowing crops]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii – Bulletin Samara state agricultural academy*, 3, 3-7 [in Russian].
2. Laryushin, N. P., & Machnev, A. V. (2015). Rezulitaty laboratornykh issledovani soshnika s podpruzhinennym raspredelitelem i kopiruyushchim ustroystvom dna borozdy [Results of laboratory studies of a coulter with a spring-loaded dispenser and copying device for the]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific Review*, 17, 33-39 [in Russian].
3. Machnev, A. V., Machnev, V. A., Horev, P. N., & Horev, A. N. (2014). Rezulitaty laboratornykh issledovani vysevaiushchego apparata s nesimmetrichnym profilom zhelobkov katushki [Results of laboratory tests of the sowing device with the asymmetrical profile of fillets of the reel]. *Niva Povolzhia – Niva Povolzhya*, 2 (31), 76-84 [in Russian].
4. Machneva, O. Yu., Kablukov, V. S., Kukharev, O. N., Machnev, A. V., & Machnev, V. A. (2018). Issledovanie vzaimodejstviia semian s raspredel'aiushchim i otrazhaiushchim ustroystvami [Research of the interaction of seeds with distributing and reflecting devices]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva – Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostycheva*, 4 (40), 111-117 [in Russian].
5. Rakhimov, Z. S., Khlyzov, N. T., Rakhimov, I. R., Sidorchenko, D. V., & Galimov, A. N. (2017). Obosnovaniie parametrov pnevmaticheskoi sistemy transportirovaniia semian i udobrenii pochvoobrabatyvaiushchego posevnogo agregata [Parameters substantiation of pneumatic system for conveying seeds and fertilizes in tillage sowing unit]. *APK Rossii – Agro-Industrial complex of Russia*, 24, 1, 91-104 [in Russian].
6. Zmievskij, V. T. Domina, N. N., & Kazakov, L. B. (1985). Vliyanii razlichii v vyseve otdelnymi apparatami na urozhajnost [The effect of differences in seeding by individual machines on yield]. *Mekhanizatsiia i ehlektrifikatsiia sel'skogo hoziaistva – Mechanization and electrification of agriculture*, 5, 40-41 [in Russian].
7. Mudarisov, S. G., & Rakhimov, Z. S. (2014). Obosnovaniie parametrov dvukhfaznogo techeniia «vozdukh – semena» pri matematicheskom opisaniu raboty pnevmaticheskoi sistemy zernovoi seyalki [Substantiation of «air-seeds» two-phase flow parameters under mathematical description of the work of pneumatic system of grain seeder]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Vestnik Bashkir State Agrarian University*, 4, 85-91 [in Russian].
8. Kryuchin, N. P. (2008). *Povysheniie ehffektivnosti raspredelitelino-transportiruiushchikh sistem pnevmaticheskikh posevnykh mashin [Improving the efficiency of distribution and transport systems of pneumatic seeding machines]*. Samara: PC Samara SAA [in Russian].
9. Pyataev, M. V. (2013). Modelirovaniie parametrov turbulizatora pnevmaticheskogo raspredelitel'ia semian [Modeling the turbulence stimulator parameters of a pneumatic seed distributor]. *Vestnik Cheliabinskoi GAA – Bulletin of the Chelyabinsk SAA*, 65, 50-55 [in Russian].
10. Davydov, S. Ya. (2016). Raschet pnevmotransporta shtuchnykh gruzov [Calculation of pneumatic transport piece objects]. *Teoriia i praktika mirovoi nauki – Theory and practice of world science*, 2, 54-59 [in Russian].
11. Kantaev, A. S., Brus, I. D., & Turaev, N. S. (2015). *Raschet ustanovok pnevmotransporta [Calculation of pneumatic transport installations]*. Tomsk: Publishing House of Tomsk polytechnic university [in Russian].
12. Lei X. et al. (2018). Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat. *Computers and electronics in agriculture*, 150, 98-109.
13. Lei X. et al. (2017). Simulation and experiment of gas-solid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 3, 7.