

Обоснование величины давления воздушного потока для транспортирования растительного материала

¹*АБУЛХАИРОВ Дармен Каратаевич, д.т.н., профессор, adk511@bk.ru, talgar_45@bk.ru,

²САГЫНГАНОВА Индира Кенесовна, PhD, старший преподаватель, sagynganova_ik@enu.kz,

¹УСЕРБАЕВ Муратбек Турарбекович, к.т.н., зав. кафедрой, usermur@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Астана, пр. Женис, 62,

²НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Статья посвящена анализу процесса погрузки растительной массы в сборочную камеру, осуществляемого за счет энергии воздушного потока, вырабатываемого вентилятором и кинетической энергией, сообщаемой ему лопастями ротора. Приведены теоретические расчеты, выполненные с использованием экспериментальных данных из литературных источников, посвященных исследованию пневмотранспортировки сеносоломистого материала. Данные расчеты позволили определить ориентировочный диапазон величины воздушного потока для разрабатываемого способа транспортировки сена. Для определения потерь давления воздуха рассмотрен баланс сопротивлений движению воздуха и материала в воздухопроводе по уравнению Бернулли для элементарного участка. В результате аэродинамических исследований выявлены: зависимость скорости воздушного потока по ширине сечения от расстояния до погрузчика при различной частоте вращения ротора вентилятора. Экспериментально установлены кривые распределения скоростей, имеющих вид параболы с вершиной в середине воздуховода, и зависимости значений скоростей от частоты вращения ротора. Полученные экспериментальные данные позволили оценить теоретические предпосылки, возможность использования в расчетах транспортирования по воздухопроводу погрузчика уравнения Бернулли.

Ключевые слова: скорость, давление воздушного потока, сопротивление движению, воздухопровод погрузчика, пневмотранспортировка растительного материала, потери давления при движении чистого воздуха, уравнения Бернулли для элементарного участка.

Введение. Анализ принятых в сельском хозяйстве технологий и используемых при этом технических средств уборки сено-соломистого материала показывает, что процесс предусматривает следующие взаимосвязанные операции: кошение и укладка травы в валки; сушка травы в валках; подбор сена; погрузка в сборочную емкость; формирование копен (стогов) в емкости; транспортировка к местам хранения.

Обзор исследований способов погрузки растительной массы в емкость показывает, что материал можно перемещать: энергией воздушного потока, вырабатываемой вентилятором; кинетической энергией, сообщаемой лопастями ротора; за счет мультипликативного эффекта от приложения как пневматических, так и механических силовых составляющих [1, 2, 3, 4]. Среди них более эффективным для погрузки сена, с точки зрения снижения потерь, представляется первый способ, т.к. в этом случае выдерживается щадящий режим перемещения ценного продукта.

Методика анализа баланса энергии воздушного потока. При осуществлении пневмопо-

дачи массы в сборочную емкость энергия потока воздуха, в общем случае, расходуется на обеспечение приема и направление массы с подборщика в воздухопровод погрузчика. Для этого на входе погрузчика должно создаваться перемещение материала со скоростью v_2 , м/с, а на выходе она имеет скорость v_1 , м/с (рисунок 1).

Рассмотрим значение скорости v_2 , обеспечивающей на выходе из воздухопровода (сечение В-В) развитие и достижение скорости воздушного потока v_1 .

Предполагаем, что в этом случае преодолевается сопротивление движению воздуха P_B и материала P_M в воздухопроводе, создание и поддержание заданной скорости движения материала и воздушного потока P_v , подъема смеси материала и воздуха P_h на высоту h . Таким образом, воздушный поток в процессе работы должен развивать давление, равное:

$$P = P_B + P_M + P_v + P_h, \text{ Па.} \quad (1)$$

Для определения потерь давления при движении чистого воздуха воспользуемся общей фор-

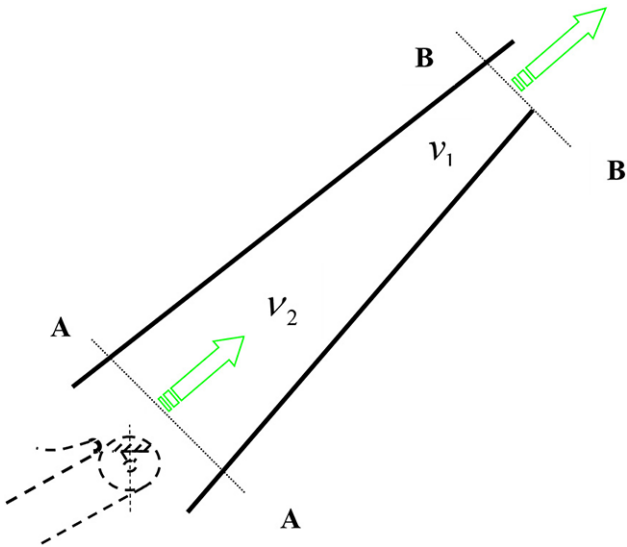


Рисунок 1 – Схема транспортирования массы воздушным потоком

мой уравнения Бернулли [2, 3, 5, 6] для элементарного участка воздухопровода длиной dl :

$$dz + \frac{dP}{\gamma_b} + \frac{v dv}{g} + \frac{dU}{A} + dR = 0, \quad (2)$$

где z – геометрическая высота, характеризующая потенциальную энергию давления воздуха, м;
 P – давление воздуха, Па;
 γ_b – объемная масса воздуха, кг/м³;
 v – скорость движения потока, м/с;
 U – внутренняя энергия воздуха, ккал/кг;
 A – тепловой эквивалент единицы работы, ккал/кг;
 R – высота потерь, характеризующая потери от трения при движении воздуха на участке АВ воздухопровода.

Для небольшой высоты подъема ($h < 20$ м), постоянной температуры воздуха и его неизменной внутренней энергии, низкого давления ($P < 5000$ Па) уравнение (2) примет вид:

$$\frac{dP}{\gamma_b} + dR = 0. \quad (3)$$

С учетом потери на трение элементарного участка:

$$\frac{dP}{\gamma_b} + \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2} dl = 0. \quad (4)$$

Решая это уравнение, находим потерю давления при транспортировке чистого воздуха по воздухопроводу:

$$P_b = \lambda \frac{l}{D} \gamma_b \frac{v_b^2}{2}, \text{ Па.} \quad (5)$$

где l, D – длина и приведенный диаметр воздухопровода, м;
 λ – коэффициент сопротивления;
 v_b – скорость потока, м/с.
 При исследовании потерь давления для пре-

одоления сопротивления движению воздуха P_b и материала P_m [3, 4, 7, 8] принято их объединить и заменить сопротивлением смеси:

$$P_{см} = P_b + P_m = P_b + P_b \alpha \mu = P_b (1 + \alpha \mu), \text{ Па,} \quad (6)$$

где α – опытный коэффициент;
 μ – весовая концентрация смеси, представляющая собой отношение массы материала (G_m , кг/с) к массе воздуха (G_b , кг/с), проходящей по воздухопроводу в единицу времени.

После замены $P_b + P_m$ на $P_{см}$ уравнение (1) переписывается:

$$P = P_{см} + P_v + P_h, \text{ Па.} \quad (7)$$

Для определения потери давления на разгон материала воспользуемся уравнением:

$$P_v = B \mu \gamma_b v_b^2, \text{ Па,} \quad (8)$$

где B – постоянный коэффициент (для легкого материала $B = 0,122$).

Сопротивление при подъеме смеси воздуха и материала:

$$P_h = \mu h' \gamma_b g, \text{ Па,} \quad (9)$$

где h' – высота подъема смеси, м.

Обоснование величины давления. Подставляя в (7) значения слагаемых, находим суммарное давление, которое необходимо развить давлению воздуха в сечении А-А, достаточное для транспортирования смеси воздуха и сеносоломистой массы по воздухопроводу:

$$P_{сум} = \lambda \frac{l}{D} \gamma_b \frac{v_b^2}{2} (1 + \alpha \mu) + B \mu \gamma_b v_b^2 + g \mu h' \gamma_b, \text{ Па.} \quad (10)$$

Расчеты, выполненные по формуле (10) с использованием экспериментальных данных из литературных источников, посвященных исследованию пневмотранспортировки сеносоломистого материала [1, 3], позволили определить ориентировочный диапазон величины $P_{сум} = 500 \dots 1000$ Па для разрабатываемого способа транспортировки сена.

Необходимая средняя скорость воздушного потока на входе в воздухопровод погрузчика (сечение А-А) определяется по формуле:

$$v_2 = \sqrt{\frac{P_{сум}}{\gamma_b}}, \text{ м/с.} \quad (11)$$

Проведенные выше теоретические исследования позволяют определить искомое значение скорости v_2 , которое должно обеспечить на выходе из воздухопровода (сечение В-В) развитие скорости воздушного потока v_1 :

$$v_1 = \frac{V_b}{F_{1b}}, \text{ м/с.} \quad (12)$$

Как показывают предварительные расчеты, для работы погрузчика необходим большой расход воздуха (ориентировочно более 4 м³/с):

$$V_b = v_1 F_{1b}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (13)$$

О величине давления можно судить по соотношению:

$$P_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} v_2^2 = \gamma_{\text{в}} \left(v_1 \frac{F_{12}}{F_{23}} \right)^2, \text{ Па}, \quad (14)$$

если $\gamma_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $v_{1\text{ср}} = 20 \text{ м/с}$, тогда $P_{\text{сум}} \geq 500 \text{ Па}$.

Результаты аэродинамических исследований. В результате аэродинамических исследований выявлены: зависимость скорости воздушного потока по ширине сечения от расстояния до погрузчика при частоте вращения ротора 720 мин^{-1} и 1100 мин^{-1} (рисунок 2) [9].

При удалении от выходного сечения распределение скоростей имеет вид параболы с вершиной в середине воздуховода. С увеличением частоты вращения ротора скорость воздуха увеличивается как в середине, так и на краях воздуховода также в виде параболы.

Полученные экспериментальные данные позволили оценить теоретические предпосылки о возможности использования в расчетах транспортирования по каналу погрузчика известного уравнения Бернулли. В связи с большой трудностью организации сложных экспериментов здесь мы ограничились определением только потери давления при транспортировке чистого воздуха:

$$P = \lambda \frac{l}{D} \gamma \frac{v_{\text{в}}^2}{2}, \text{ Па}, \quad (15)$$

где l – длина воздуховода (рисунок 1, $l = AB$), м;

D – приведенный диаметр начального участка воздуховода в сечении В-В (ширина $a = 1,97 \text{ м}$, высота $b = 0,394 \text{ м}$);

λ – коэффициент сопротивления воздуховода

(0,5);

γ – объемная масса воздуха ($1,2 \text{ кг/м}^3$).

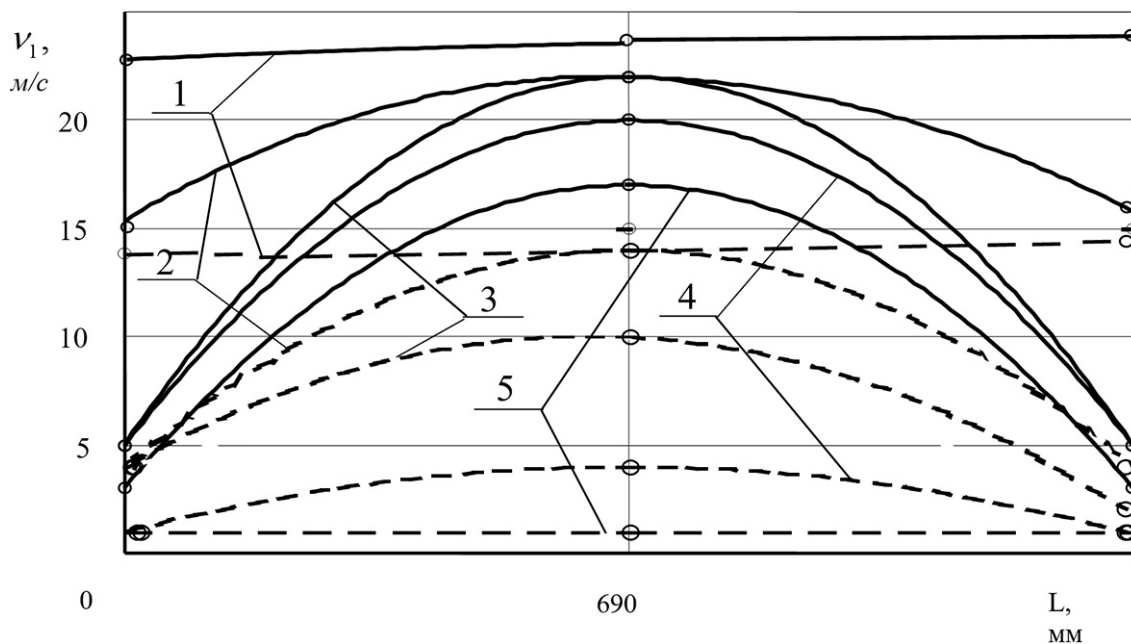
Приведенный диаметр воздуховода, имеющего прямоугольную форму в сечении, подсчитан по формуле:

$$D = \frac{2ab}{a+b} = 0,66, \text{ м}. \quad (16)$$

В экспериментах среднюю скорость v_2 можно было задавать равной 25,2; 28,8; 32,4; 36,0 м/с. При скорости $v_2 = 36 \text{ м/с}$ потери давления воздуха по формуле (15) составили $P = 1006 \text{ Па}$.

Заключение

Эффективность работы уборочно-транспортного агрегата определяет начальная скорость подачи сеносоломистого материала в сборочную емкость, с ней должна увязываться скорость на входе погрузчика. Для решения этой задачи были проведены теоретические расчеты, нашедшие экспериментальное подтверждение, по нахождению значений скорости v_2 , обеспечивающей на выходе из воздухопровода (сечение В-В) развитие и достижение скорости воздушного потока v_1 . Так, в экспериментальных исследованиях транспортирования воздуха при скорости $v_2 = 23 \text{ м/с}$ на расстояние 2 м от сечения В-В отмечено снижение скорости до 17 м/с, т.е. уменьшение скорости более чем наполовину. Это указывает на правомочность выдвинутых теоретических предпосылок пневмотранспортирования растительного материала и дает возможность последующей разработки пневмомеханической технологической схемы подбора и транспортирования сеносоломистой массы.



1 – 0 м; 2 – 0,5 м; 3 – 1,0 м; 4 – 1,5 м; 5 – 2,0 м от козырька (– 1100; – – 720 об/мин)

Рисунок 2 – Зависимость скорости воздуха v_1 (на выходе из воздуховода) по ширине сечения от расстояния до погрузчика

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абулхаиров Д.К., Сагынганова И.К., Усербаев М.Т. Обоснование технологической схемы и параметров механизма уплотнения сена в сборочной камере // «Университет еңбектері – Труды университета» / Караг. техн. ун-т. – Караганда, 2022. № 1 (86). 346 с. С. 11-15.
2. Офат Е.А. Исследование технологического процесса транспортирования солоmistых материалов // Сб. Земледельческая механика. – М., 1965. Т. IV. С. 236.
3. Турбин Б.Г., Киров Б. С. К анализу швырялки // Записки ЛСХИ. – 1962. Т. 88.
4. Алиева Р.Г. Отделение шелухи очищенного фундука воздушным потоком // Аграрная наука. 2017. № 11-12. С. 27-29.
5. Бурков А.И., Глушков А.Л., Лазыкин В.А. Влияние зернового материала на поле скоростей и расчётные траектории частиц в вертикальном пневмосепарирующем канале. Энергосберегающие агротехнологии и техника для северного земледелия и животноводства: монография / Под общ. ред. В.А. Сысуева. Киров: ООО «Кировская областная типография», 2018. 390 с.
6. Попкова О.С., Лорай С.Ф., Дмитриев А.В., Зверева Э.Р. Транспортировка мелкодисперсного сыпучего материала под избыточным давлением // Вестник Иркутского государственного технического университета. Т. 21. 2017. № 11.
7. Дмитриев А.Э., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. Пневмотранспортная установка для транспортировки мелкодисперсного материала. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018.
8. Фоминых А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С. Методика расчета пневмотранспортной установки экструдированной сои // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 3.
9. Абулхаиров Д.К. Результаты аэродинамических исследований транспортировки сена воздушным потоком // Материалы республиканской научной конференции «Моделирование механических систем и процессов» – Караганда: КарГУ, 2007. – С. 57-60.

Өсімдік материалды тасымалдау үшін ауа ағыны қысымының мәнін негіздеу

¹**АБИЛҚАЙЫРОВ Дәрмен Каратайұлы**, т.ғ.д., профессор, adk511@bk.ru, talgar_45@bk.ru,

²**САҒЫНҒАНОВА Индира Кенесқызы**, PhD, аға оқытушы, sagynганова_ik@enu.kz,

¹**ӨСЕРБАЕВ Мұратбек Тұрарбекұлы**, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі, usermur@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Жеңіс даңғылы, 62,

²«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақала желдеткіш тудыратын ауа ағынының энергиясы және оған ротор қалақтары беретін кинетикалық энергия есебінен жүзеге асырылатын құрастыру камерасына зауыт массасын тиеу процесін талдауға арналған. Шөп-сабанды пневматикалық тасымалдауды зерттеуге арналған әдебиеттерден алынған тәжірибелік мәліметтерді пайдалана отырып орындалған теориялық есептеулер берілген. Бұл есептеулер әзірленген шөп тасымалдау әдісі үшін ауа ағынының шамамен диапазонын анықтауға мүмкіндік берді. Ауа қысымының жоғалуын анықтау үшін элементар қима үшін Бернулли теңдеуі бойынша ауа құбырындағы ауа мен материалдың қозғалысына қарсылық балансы қарастырылды. Аэродинамикалық зерттеулер нәтижесінде келесілер анықталды: желдеткіш роторының әртүрлі жылдамдықтарында жүк тиегішке дейінгі қашықтыққа қима ені бойынша ауа ағынының жылдамдығының тәуелділігі. Ауа өткізгішінің ортасында төбесі бар парабола түріндегі жылдамдықтардың таралу қисықтары және жылдамдықтардың ротордың айналу жиілігіне тәуелділігі тәжірибе жүзінде белгіленді. Алынған тәжірибелік деректер теориялық алғышарттарды, жүк тиегіштің ауа өткізгіші арқылы тасымалдауды есептеуде Бернулли теңдеуін қолдану мүмкіндігін бағалауға мүмкіндік берді.

Кілт сөздер: жылдамдық, ауа ағынының қысымы, қозғалыс кедергісі, тиегіш ауа құбыры, өсімдік материалының пневматикалық тасымалдануы, таза ауа қозғалысы кезіндегі қысымның жоғалуы, элементар қима үшін Бернулли теңдеулері.

Justification of the Value of Air Flow Pressure for Transportation of Plant Material

¹**ABULKHAIROV Darmen**, Dr. of Tech. Sci., Professor, kasimov5301@mail.ru,

²**SAGYNGANOVA Indira**, PhD, Senior Lecturer, sagynганова_ik@enu.kz,

¹**USSERBAYEV Muratbek**, Cand. of Tech. Sci., Head of Department, usermur@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University», Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62,

²NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the process of loading plant mass into the assembly chamber, carried out due to the energy of the air flow generated by the fan and the kinetic energy imparted to it by the rotor blades. Theoretical calculations performed using experimental data from the literature devoted to the study of hay-straw material pneumatic transport are presented. These calculations made it possible to determine the approximate range of

the air flow for the developed hay transportation method. To determine the air pressure loss, the balance of resistance to the movement of air and material in the air duct was considered according to the Bernoulli equation for an elementary section. As a result of aerodynamic studies, the following was revealed: the dependence of the air flow velocity along the section width on the distance to the loader at different fan rotor speeds. Curves of distribution of velocities having the form of a parabola with a vertex in the middle of the air duct and the dependence of the velocities on the rotor speed were experimentally established. The obtained experimental data made it possible to evaluate the theoretical prerequisites, the possibility of using the Bernoulli equation in the calculations of transportation through the air duct of the loader.

Keywords: speed, air flow pressure, movement resistance, loader air duct, plant material pneumatic conveying, pressure losses during the movement of clean air, Bernoulli equations for an elementary section.

REFERENCES

1. Abulhairov D.K., Sagynganova I.K., Userbaev M.T. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy i parametrov mekhanizma uplotneniya sena v sborochnoy kamere // «Universitet eribekteri – Trudy universiteta» / Karag. tekhn. un-t. – Karaganda, 2022. No. 1 (86). 346 p. Pp. 11-15.
2. Ofat E.A. Issledovanie tekhnologicheskogo processa transportirovaniya solomistykh materialov // Sb. Zemledel'cheskaya mekhanika. – Moscow, 1965. T. IV. P. 236.
3. Turbin B.G., Kirov B.S. K analizu shvyryalki // Zapiski LSKHI. – 1962. T. 88.
4. Alieva R.G. Otdelenie sheluhi ochishchennogo funduka vozdushnym potokom // Agrarnaya nauka. 2017. No. 11-12. Pp. 27-29.
5. Burkov A.I., Glushkov A.L., Lazykin V.A. Vliyaniye zernovogo materiala na pole skorostej i raschyotnye traektorii chastic v vertikal'nom pnevmosepariruyushchem kanale. Energoberegayushchie agrotekhnologii i tekhnika dlya severnogo zemledeliya i zhivotnovodstva: monografiya / Pod obshch. red. V.A. Sysueva. Kirov: OOO «Kirovskaya oblastnaya tipografiya», 2018. 390 p.
6. Popkova O.S., Loraj S.F., Dmitriev A.V., Zvereva E.R. Transportirovka melkodispersnogo sypuchego materiala pod izbytochnym davleniem // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. T. 21. 2017. No. 11.
7. Dmitriev A.E., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Pnevмотransпортная установка для транспортировки мелкодисперсного материала. – Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018.
8. Fominyh A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S. Metodika rascheta pnevmotransportnoy ustanovki ekstrudirovannoy soi. – Vestnik Kurganskoy GSKHA. 2019. No. 3.
9. Abulhairov D.K. Rezul'taty aerodinamicheskikh issledovaniy transportirovki sena vozdushnym potokom // Materialy respublikanskoj nauchnoj konferencii «Modelirovaniye mekhanicheskikh sistem i processov» – Karaganda: KarGU, 2007. – Pp. 57-60.