

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 532.5.013:697.9

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-6-32-37

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ
РАСПЫЛА ЖИДКОСТЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА****КОЖЕВНИКОВА НАТАЛЬЯ ГЕОРГИЕВНА**, канд. техн. наук, доцентenergo-ngk@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>**ШЕВКУН НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**, канд. с.-х. наукenergo-shevkun@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>**ШЕВКУН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**, канд. с.-х. наукvshevkun@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>**ДРАНЫЙ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**✉, канд. техн. наукenergo-dranyu@rgau-msha.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Аннотация. Процессы движения воздушных сред в различных типах воздухопроводов представляют большой практический интерес при проектировании, создании и монтаже распыливающих устройств, применяющихся в сельскохозяйственном производстве для создания искусственного тумана, при мелкодисперсном дождевании, обработке сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней. При анализе существующих методов распыла жидкости, их основных достоинств и недостатков, установлено, что пневматический метод позволяет распыливать загрязненные жидкости и имеет небольшую зависимость качества распыливания от расхода жидкости. Выявлено, что одним из основных факторов, влияющих на качественные показатели распыливающих устройств, является величина динамического давления газовой среды, воздействующей на жидкость в процессе её распыла. Проведены исследования по определению влияния на величину динамического давления воздушного потока при его движении в горизонтальном воздуховоде трех факторов: наличие дополнительного сопротивления, оцениваемого величиной эффективной площади воздуховода; положение точки, в которой измерялось давление относительно оси воздуховода; расстояние точки измерения динамического давления от источника воздушного потока. Опытные данные проверены на воспроизводимость по критерию Кохрена при 5%-ном уровне значимости, который показал, что процесс воспроизводим. Исследования показали, что наличие дополнительного сопротивления в воздуховоде и положение точки измерения динамического давления относительно оси воздуховода имеют одинаковое влияние на его величину. Наиболее существенное влияние на динамическое давление воздушного потока оказывает удаленность точки его измерения от его источника.

Ключевые слова: распыл жидкостей, воздушный поток, искусственный туман, динамическое давление, воздухопровод, многофакторный эксперимент.

Формат цитирования: Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В. Экспериментальные исследования условий распыла жидкостей посредством воздушного потока // Агроинженерия. 2021. № 6(106). С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>.

© Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В., 2021



ORIGINAL PAPER

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE CONDITIONS OF SPRAYING LIQUIDS
WITH THE AIR FLOW****NATALYA G. KOZHEVNIKOVA**, PhD (Eng), Associate Professorenergo-ngk@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>**NIKOLAYA A. SHEVKUN**, PhD (Ag)energo-shevkun@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>

VLADIMIR A. SHEVKUN, PhD (Ag)

vshevkun@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>

ALEKSANDR V. DRANIY[✉], PhD (Eng)

energo-dranyy@rgau-msha.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Abstract. The processes of air movement in various types of air ducts are of great practical interest in terms of designing, manufacturing, and installing spraying devices used in agricultural production to create artificial fog with fine sprinkling and treat crops from pests and diseases. The authors analyze the existing methods of liquid spraying and reveal their main advantages and disadvantages. Under special attention is the pneumatic method. The study found that this method is used to spray contaminated liquids and the spray quality insignificantly depends on the liquid flow rate. It was revealed that one of the main factors affecting the quality indicators of spraying devices is the dynamic pressure of the gas medium acting on the liquid during its spraying. The research has determined that the dynamic pressure value of the airflow during the liquid movement in a horizontal duct depends on three factors: the presence of additional resistance, estimated by the value of the effective area duct, the position of the point at which the pressure was measured relative to the duct axis and the distance between the measurement point and the airflow source. The experimental data were tested for reproducibility using the Cochran criterion at the 5% significance level, which proved the process reproducibility. The research has shown that the presence of additional resistance in the duct and the position of the dynamic pressure measurement point relative to the axis of the duct have the same effect on its value. The dynamic pressure of the airflow is primarily dependent on the remoteness of the measurement point from its source.

Key words: liquid spraying, air flow, artificial fog, dynamic pressure, air duct, multifactor experiment.

For citation: Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Shevkun V.A., Draniy A.V. Experimental study of the conditions of spraying liquids with the air flow. *Agricultural Engineering*, 2021; 6 (106): 32-37. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>.

Введение. При орошении и обработке сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей, создании микроклимата в животноводческих помещениях особый интерес представляет применение искусственного тумана и мелкодисперсного дождевания.

Рациональное использование рабочих растворов химических препаратов при обработке сельскохозяйственных культур с целью экономии и соблюдения точных норм внесения препаратов, для предотвращения отрицательного воздействия на окружающую среду требует особого внимания к конструкциям распыливающих устройств и методам распыла жидкости [1].

Распыл жидкости можно осуществлять различными методами: механическим, гидродинамическим, пневматическим, ультразвуковым, электростатическим, термическим и термомеханическим [2]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки и нашел практическое применение в конструкциях распыливающих устройств.

Пневматический метод распыла жидкости предполагает дробление вытекающей из сопла жидкости движущимся с большой скоростью потоком воздуха или иного газа. Этот метод находит свое применение в конструкциях аэрозольных установок, малообъемных опрыскивателях, увлажнителях и т.д.

Эффективность и перспективность применения пневматического метода распыла жидкости подтверждаются не только отечественными, но и зарубежными исследованиями. Применение пневматических распылителей позволяет уменьшить разнос ветром рабочего раствора, увеличить площадь его осаждения не только на внешнюю, но и на внутреннюю листовую

поверхность обрабатываемого растения, что способствует большей эффективности проводимых мероприятий [3, 4].

Исследования работы пневматических распылителей, проводимые зарубежными учеными, также подтверждает взаимосвязь расхода рабочей жидкости и сжатого воздуха с техническими параметрами распыливающего устройства. С увеличением диаметра выходного отверстия происходит увеличение расхода сжатого воздуха и снижение расхода рабочей жидкости. Размер капель зависит от геометрических параметров выходного отверстия и от расхода воздуха [4]. Поэтому данный способ распыливания жидкости представляет большой интерес для разработки более совершенных технических средств по уходу за сельскохозяйственными культурами.

К достоинствам пневматического метода относятся небольшая зависимость качества распыливания от расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыливания загрязненных жидкостей. Недостатками являются необходимость распыливающего агента и оборудования для его подачи, а также повышенный расход энергии на распыливание, которая в основном затрачивается на производство и подачу распыливающего агента.

Одним из основных факторов, влияющих на качественные показатели работы устройств, основанных на пневматическом методе распыла жидкости, является величина динамического давления (скоростного напора потока газовой среды, от которого зависит скорость, а соответственно и расход потока), воздействующего на жидкость. Поэтому выявление факторов, влияющих

на величину динамического давления в воздуховодах, заслуживает особого внимания.

Представляют большой интерес процессы движения воздушных сред в воздуховодах различной формы, что обусловлено необходимостью повышения энергоэффективности вентиляционных систем [5]. При проектировании и монтаже вентиляционных систем необходимо, чтобы подача выбранного вентилятора как можно более близко подходила к расчетным значениям. Существенными параметрами, влияющими на характеристику сети, являются аэродинамические сопротивления, представляющие собой сопротивления по длине и местные сопротивления, которые вызывают возникновение потерь напора. При этом местные сопротивления вызывают более существенные потери по сравнению с сопротивлением по длине [6, 7].

Цель исследований: выявление фактов, влияющих на величину динамического давления воздушного потока в воздуховоде.

Материалы и методы. Исследование факторов, влияющих, на величину динамического давления воздушного потока, проводилось методом многофакторного планирования эксперимента. Для построения регрессионной модели процесса был принят двухуровневый трехфакторный план полного факторного эксперимента (тип 2³)¹. Исследования проводились на лабораторной установке, состоящей из горизонтального воздуховода диаметром 100 мм, канального осевого вентилятора, контрольно-измерительной аппаратуры, включающей в себя дифференциальные датчики давления, трубки полного на-

ра (трубки Пито), термометр, барометр, счетчик оборотов (рис. 1)² [8].

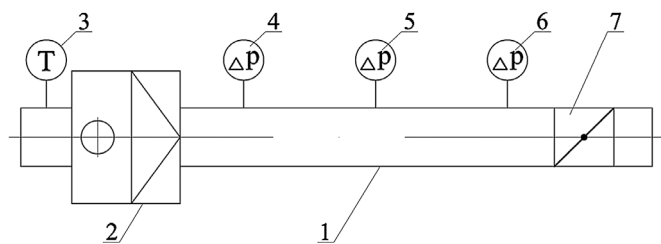


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – воздуховод; 2 – канальный осевой вентилятор;
- 3 – термометр;
- 4, 5, 6 – дифференциальные датчики давления;
- 7 – дроссельная заслонка

Fig. 1. Scheme of the laboratory installation:

- 1 – air duct; 2 – axial duct fan;
- 3 – thermometer; 4, 5, 6 – differential pressure sensors;
- 7 – throttle valve

В качестве факторов, влияющих на величину динамического давления, были выбраны: наличие дополнительного сопротивления воздушному потоку (рис. 2), которое оценивалось величиной эффективной площади живого сечения воздуховода; смещение трубки Пито относительно оси воздуховода; расстояние от осевого вентилятора до места установки трубки Пито. Кодовое обозначение факторов, интервалы и уровни их варьирования приведены в таблице 1.

¹ Хайлис Г.А., Ковалев М.М. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. М.: Колос, 1994. 169 с.

² Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В. Механика жидкости и газа: учебное пособие. М.: ООО «Мегаполис», 2021. 161 с.

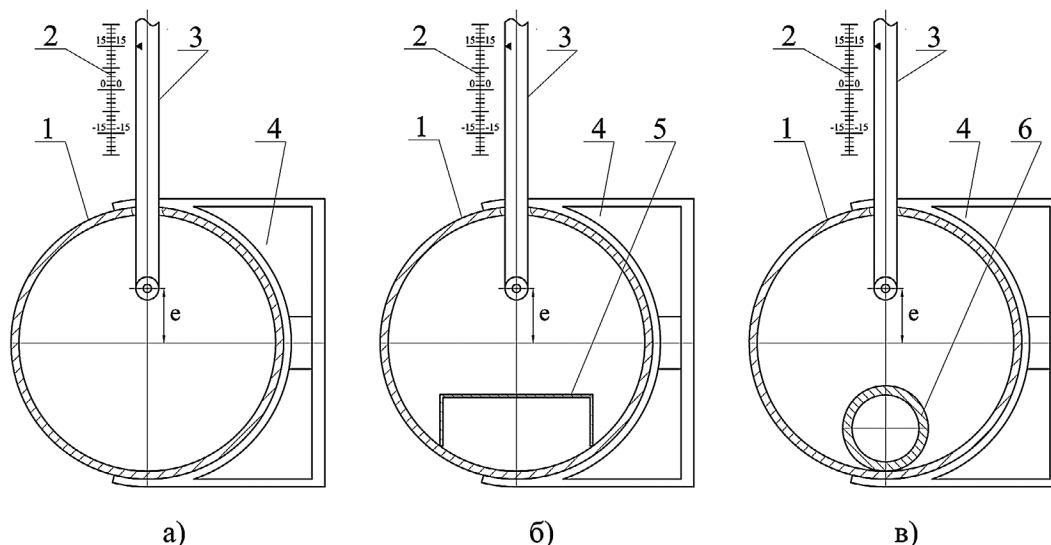


Рис. 2. Схема размещения сопротивления воздушному потоку в воздуховоде без сопротивления (а), с сопротивлением в виде профиля (б) и с сопротивлением в виде трубы (в):

- 1 – воздуховод; 2 – шкала установки трубки Пито; 3 – трубка Пито;
- 4 – крепление воздуховода; 5 – П-образный профиль; 6 – труба; е – эксцентриситет

Fig. 2. Scheme of air flow resistance points in the air duct without resistance (a), with a profile-type resistance (b), with a pipe-type resistance (c):

- 1 – air duct; 2 – scale for installing the Pitot tube; 3 – Pitot tube; 4 – fastening of the air duct;
- 5 – U-shaped profile; 6 – pipe; e – eccentricity

Таблица 1

Кодирование факторов

Table 1

Factor coding

Фактор, единица измерения <i>Factor, measurement units</i>	Натуральное обозначение <i>Natural designation</i>	Кодовое обозначение <i>Code designation</i>	Интервал варьирования <i>Variation interval</i>	Уровни варьирования натуральные <i>Natural variation levels</i>			Уровни варьирования кодовые <i>Code variation levels</i>		
				верхний <i>upper</i>	нулевой <i>zero</i>	нижний <i>lower</i>	верхний <i>upper</i>	нулевой <i>zero</i>	нижний <i>lower</i>
Наличие дополнительного сопротивления, м ² <i>Additional resistance, m²</i>	X ₁	x ₁	0,0002	0,00785	0,007586	0,0078	+1	0	-1
Смещение трубки Пито от оси воздуховода, м <i>Displacement of the Pitot tube from the duct axis, m</i>	X ₂	x ₂	0,15	+0,15	0	-0,15	+1	0	-1
Расстояние от вентилятора до трубки Пито, м <i>Distance between the fan and the Pitot tube, m</i>	X ₃	x ₃	0,5	0,185	0,5	1,185	+1	0	-1

За выходной параметр была принята величина динамического давления потока воздуха, значения которого были измерены в трехкратной повторности, посредством трубок Пито и дифференциальных датчиков давления при значениях температуры окружающей среды 21°C,

атмосферном давлении 98,7 кПа и частоте вращения вала осевого вентилятора 41 об/мин.

Результаты и обсуждение. После проведения серии опытов были получены величины динамического давления (y) (табл. 2).

Таблица 2

Значения выходного параметра

Table 2

Output parameter values

Точка плана <i>Point in the plan</i>	x ₁	x ₂	x ₃	Выходной параметр y , / <i>Output parameter y,</i>		
				первая повторность y_{u1} <i>first repetition y_{u1}</i>	вторая повторность y_{u2} <i>second repetition y_{u2}</i>	третья повторность y_{u3} <i>third repetition y_{u3}</i>
1	-1	-1	-1	76	80	69
5	-1	-1	1	76	90	78
7	-1	1	1	84	97	88
4	1	1	-1	104	109	113
3	-1	1	-1	106	104	106
6	1	-1	1	100	81	78
8	1	1	1	92	103	90
2	1	-1	-1	100	117	109

Опытные данные были проверены на воспроизводимость по критерию Кохрена при 5%-ном уровне значимости, который показал, что процесс воспроизводим. Учитывая воспроизводимость процесса, вычислили значения коэффициентов уравнения регрессии:

$$y = 93,75 + 5,92x_1 + 5,92x_2 - 5,67x_3 + 93,75x_1^2 + 93,75x_2^2 + 93,75x_3^2 - 3,75x_1x_2 - 3,33x_1x_3 - 1,67x_2x_3. \quad (1)$$

Полученное уравнение регрессии проверили на адекватность по критерию Фишера. Проверка на адекватность проводилась по линейной части уравнения, неполного квадратичного уравнения и полного квадратичного уравнения [3].

В результате оценки пришли к выводу о том, что по линейной и неполной квадратичной части уравнение является адекватным. Полное квадратичное уравнение явилось неадекватным, поэтому дальнейшее определение

значимых коэффициентов производились для неполного квадратичного уравнения:

$$y = 93,75 + 5,92x_1 + 5,92x_2 - 5,67x_3 - 3,75x_1x_2 - 3,33x_1x_3 - 1,67x_2x_3. \quad (2)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась посредством критерия Стьюдента при 5%-ном уровне значимости. Коэффициент считается, значим (то есть оказывает существенное влияние на отклик), если выполняется неравенство

$$|b_a| \geq \Delta b_a = t(0,05; f_y) \frac{s_y}{\sqrt{n}},$$

где b_a – коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3 ; Δb_a – доверительный предел; $t(0,05; f_y)$ – критерий Стьюдента при 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы дисперсии воспроизводимости f_y .

Сравнив коэффициенты уравнения регрессии (2) с рассчитанным значением доверительного предела $\Delta b_a = 5,417$,

пришли к выводу о том, что значимыми коэффициентами являются b_0, b_1, b_2, b_3 , а уравнение регрессии принимает вид

$$y = 93,75 + 5,92x_1 + 5,92x_2 - 5,67x_3. \quad (3)$$

Для полученного уравнения регрессии были построены поверхности откликов, показывающие влияние факторов на величину динамического давления (рис. 3).

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что коэффициенты b_1 и b_2 имеют равную степень влияния таких факторов, как наличие дополнительных сопротивлений в воздуховоде x_1 и смещение трубки Пито относительно оси воздуховода x_2 , на величину динамического давления, причем увеличение значений этих факторов приведет к увеличению отклика. Наибольшее влияние на величину отклика оказывает коэффициент b_3 – расстояние от вентилятора до трубки Пито. Увеличение его значения приводит к уменьшению величины динамического давления.

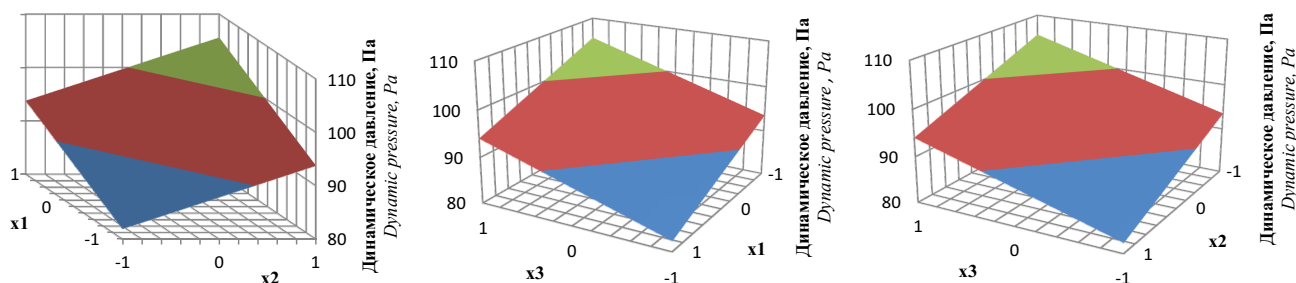


Рис. 3. Поверхности отклика

Fig. 3. Response surfaces

Выводы

1. Целесообразно применение пневматического метода распыла в конструкциях малообъемных распыливающих устройств.

2. Важнейшим фактором, влияющим на качественные показатели работы распыливающих устройств, является величина скоростного напора потока газовой среды, действующей на жидкость.

Библиографический список

1. Старостин И.А., Ещин А.В. Современное состояние средств механизации химической защиты растений в России // Агроинженерия. 2021. № 2 (102). С. 23-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-23-31>

2. Губжоков Х.Л., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. Ультрамалообъемный опрыскиватель с пневматическими распылителями // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные открытия в эпоху глобализации». г. Казань, 20 сентября 2015. Уфа: ООО «Аэтерна», 2015. С. 30-32.

3. Derksen R.C., Ranger C.M., Cafias L.A. et al. Evaluation of handgun and broadcast systems for spray deposition in greenhouse poinsettia canopies. Transactions of the ASABE, 2010; 53 (1): 5-12.

4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H. et al. PM-Power and Machinery: Design factors affecting spray characteristics

3. Факторы наличия дополнительных сопротивлений в воздуховоде и смещения трубки Пито относительно оси воздуховода имеют равную степень влияния на величину динамического давления, причем увеличение значений этих факторов ведет к увеличению отклика. Наибольшее влияние на изменение величины динамического давления газовой среды оказывает расстояние от источника воздушного потока (вентилятора) до точки расположения выхода жидкости (трубки Пито).

References

1. Starostin I.A., Eshchin A.V. Sovremennoe sostoyanie sredstv mekhanizatsii khimicheskoy zashchity rasteniy v Rossii. [Currently used mechanization means of chemical plant protection in Russia]. *Agricultural Engineering*, 2021; 2 (102): 23-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-23-31> (In Rus.)

2. Gubzhokov Kh.L., Shekikhachev Yu.A., Khazhmetov L.M. Ul'tramaloob'emnyy opryskivatel' s pnevmaticheskimi raspyslityel'nyami. *Nauchnye otkrytiya v epohu globalizatsii. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2015: 30-32. (In Rus.)

3. Derksen R.C., Ranger C.M., Cafias L.A. et al. Evaluation of handgun and broadcast systems for spray deposition in greenhouse poinsettia canopies. Transactions of the ASABE, 2010; 53(1): 5-12.

4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H. et al. PM-Power and Machinery: Design factors affecting spray characteristics

and drift performance of air induction nozzles. *Bio-systems Engineering*, 2002; 82 (3): 289-296. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0069>

5. Кирсанов В.Я., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32>

6. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В. и др. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282-289. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-161-022>

7. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P. et al. Models and algorithms of adaptive animal flow control in rotary milking parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2019; 67(6): 1465-1484. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061465>

8. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В. и др. Анализ характера распределения давления в воздушном потоке по длине воздуховода // Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Академика А.В. Лыкова «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2020». М.: ООО «Мегаполис», 2020. С. 282-286.

Критерии авторства

Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.07.2021

Одобрена после рецензирования 30.09.2021

Принята к публикации 08.10.2021

and drift performance of air induction nozzles. *Bio-systems Engineering*, 2002; 82(3): 289-296. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0069>

5. Kirsanov V.Ya., Ignatkin I.Yu. Struynaya model' pritoka ventilyatsionnogo vozdukha iz teploutilizatsionnoy ustanovki. [Jet model of ventilation air inflow from a heat-recovery unit] *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 2(84): 28-32. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-28-32> (In Rus.)

6. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Draniy A.V. et al. Analiz kharaktera raspredeleniya osnovnykh parametrov vozdušnogo potoka v vozduhovodakh. [Analysis of the main parameters of air flow in the air ducts distribution]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2020; 161: 282-289. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-161-022> (In Rus.)

7. Kirsanov V.V., Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Tareva O.A., Strebulyaev S.N., Filonov R.F. Models and algorithms of adaptive animal flow control in rotary milking parlors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 2019; 67(6): 1465-1484.

8. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Draniy A.V., Tsybal A.A. Analiz kharaktera raspredeleniya davleniya v vozdušnom potoke po dline vozdukhovoda [Analysis of air flow pressure distribution along the duct length]. *Sovremennye energosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i teplovye protsessy) SETT-2020. Sbornik nauchnykh trudov Sed'moy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya Akademika A.V. Lykova*. 2020: 282-286. (In Rus.)

Contribution

N.G. Kozhevnikova, N.A. Shevkun, V.A. Shevkun, A.V. Draniy carried out theoretical studies and conducted the experiment based on the obtained theoretical results. N.G. Kozhevnikova, N.A. Shevkun, V.A. Shevkun, A.V. Draniy have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 01.07.2021

Approved after reviewing 30.09.2021

Accepted for publication 08.10.2021