

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБОСНОВАНИЮ ФОРМЫ РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ

Сидоренко Иван Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы в агробизнесе»

Институт «Агротехнологическая академия» (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «КФУ имени В.И. Вернадского»,

245492, р. Крым, г. Симферополь, п.г.т. Аграраное, ул. Научная, 1А,

тел. +7(978)8139064, vanya.sidorenko.84@mail.ru

Ключевые слова: химическая обработка, малообъемный опрыскиватель, вращающийся распылитель, капельный поток, траектория полёта, угол факела, рабочий элемент.

На основании результатов анализа конструкций существующих машин для химической защиты садов и виноградников и их рабочих органов было сделано заключение, что для более эффективного использования малообъемного опрыскивателя следует разработать конструкцию распыливающего рабочего органа и обосновать его параметры. Исследован процесс дробления жидкости на капли вращающимся распылителем. Это осуществлено с использованием методов и законов математики, кинематики, физики, аэродинамики. Также изучена информация из описательного курса по сельскохозяйственным машинам и основ теории распыливания жидкостей. Проведено исследование схемы сил, действующих на каплю при её движении по чашеобразной поверхности вращения. На основании этого была сформирована методика расчёта угла вылета частицы жидкости с кромки чаши при различных конструктивных и режимных параметрах вращающегося распылителя. В качестве таких параметров рассматривались радиусы кромки и основания чаши, высота шарового слоя, образующего её профиль, а также частота вращения распылителя. После проведения расчётов было проведено сравнение схем образования капельного факела при работе распыливающего рабочего органа с вращающимися элементами конусообразной и чашеобразной форм. Полученные экспериментальные данные подтвердили достоверность результатов теоретических исследований. Обоснована целесообразность применения на малообъемном опрыскивателе вращающегося распылителя с конусными или чашечными рабочими элементами. Это обеспечивает повышение качественных и количественных показателей урожая плодовых культур и винограда с одновременным сокращением затрат агрохимиката и топливо-смазочных материалов, а также уменьшением негативного влияния на окружающую среду.

Введение

Недостаточный уровень механизации химической обработки садов и виноградников является актуальной проблемой для сельского хозяйства Крыма. В этом регионе широко распространено малообъемное опрыскивание с нормой внесения раствора пестицида 100...500 л/га [1, 2, 3]. Эффективность опрыскивания во многом зависит от качества работы распылителей и от типа их конструкции. Вращающиеся распылители способны при малых расходах жидкости образовывать однородные мелкие капли, размер которых можно регулировать [4]. На качество опрыскивания также влияют густота и равномерность покрытия обрабатываемых растений агрохимикатом. Поэтому целью исследований является изучение теории процесса работы вращающегося распылителя для выбора оптимальной формы его рабочего элемента и обеспечения правильной организации и направления капельного потока.

Материалы и методы исследований

В качестве методов исследований исполь-

зован патентный поиск и анализ информации по существующим разработкам с помощью электронных ресурсов и литературных источников. Изучена физико-математическая модель работы вращающегося распылителя [5]. Анализ существующих зависимостей позволил установить взаимосвязь между конструктивными параметрами вращающегося распылителя и углом раскрытия капельного факела.

Результаты исследований

Предлагаемый чашечный распылитель (рис. 2) разработан на основе конусного распылителя Micron X-1 (рис. 1) [6, 7].

При проведении исследований была изучена кинематика движения капли по поверхности рабочего элемента вращающегося распылителя [8] (рис. 3).

В качестве начальных приняты следующие условия:

- капля начинает движение на основании рабочего элемента и заканчивает на его кромке;
- радиусы основания и кромки, а также частота вращения рабочего элемента вращаю-

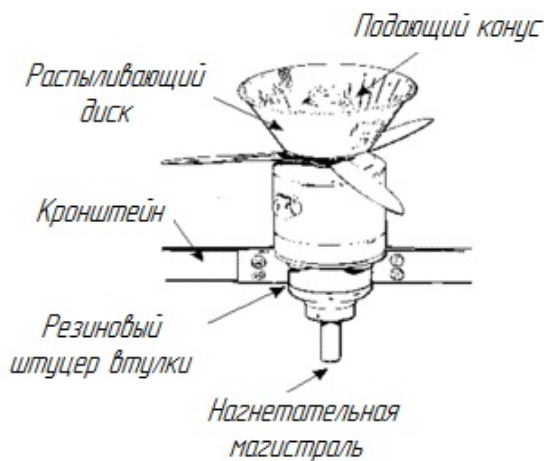


Рис. 1 – Общая схема вращающегося распылителя Micron X-1

щегося распылителя являются фиксированными параметрами;

- рабочий элемент распыливающего рабочего органа вращается равномерно;
- поверхность вращающегося элемента хорошо смачивается жидкостью [9].

Основными силами, действующими на жидкостную струю, являются сила тяжести F_B и поверхностного натяжения F_c [10]:

$$F_B = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6} \cdot \rho_{ж} \cdot R_T \cdot \omega^2 \geq F_c = \pi \cdot D_c \cdot \delta. \quad (1)$$

где D_c – диаметр жидкостной струи, м; δ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, кг/с²; d_m – диаметр образующихся ка-

пель, мкм; R_T – радиус вращающегося элемента (чаши), м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; ω – угловая скорость вращения чаши, рад/с:

$$\omega = 2\pi n_T. \quad (2)$$

В выражении (2) n_T – частота вращения распылителя, мин⁻¹.

Ускорение капли складывается из двух составляющих [11]:

$$a = \dot{a}_n + a_\tau; \quad (3)$$

$$a_n = \omega^2 h; \quad (4)$$

$$a_\tau = h\varepsilon, \quad (5)$$

где a_n – нормальное ускорение, м/с²; a_τ – тангенциальное ускорение, м/с²; ε – угловое ускорение, рад/с²; h – расстояние от места положения капли до оси вращения. Так как капля в момент отрыва находится на кромке рабочего элемента распылителя, принимаем $h=R_T$.

С учётом начальных условий, $\omega = \text{const}$, $\varepsilon = 0$, $a_\tau = 0$. Следовательно:

$$a = a_n = \omega^2 R_T = 4\pi^2 n_T^2 R_T. \quad (7)$$

При перемещении по вращающейся поверхности капля совершает два вида движения – поступательное и вращательное. Переносная скорость капли $v_{\text{ПЕР}}$ направлена по касательной к окружности кромки чаши [12]:

$$v_{\text{ПЕР}} = \omega R_T. \quad (8)$$

Относительная скорость $v_{\text{ОТН}}$ входит в уравнение силы Кориолиса F_k [13]:

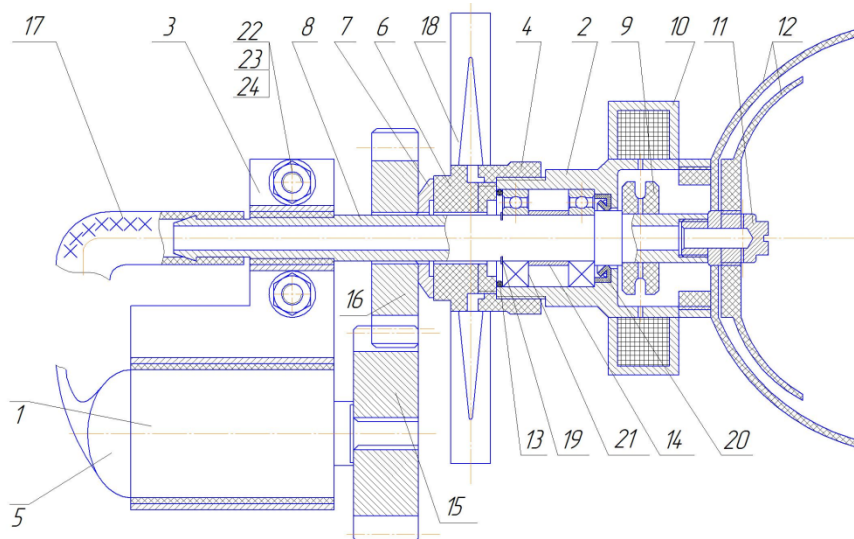


Рис. 2 – Общая схема чашечного вращающегося распылителя:

- 1 – электродвигатель; 2 – корпус; 3 – кронштейн; 4 – ступица; 5 – штепсель; 6 – зажим; 7 – упор; 8 – вал; 9 – втулка; 10 – разбрызгиватель; 11 – рассекатель; 12 – распыливающие чаши; 13 – стопорное кольцо; 14 – уплотнитель; 15 – ведущая звёздочка; 16 – ведомая звёздочка; 17 – нагнетательная магистраль; 18 – лопасть; 19 – стопор; 20 – манжета; 21 – подшипник; 22 – болт; 23 – шайба; 24 – гайка

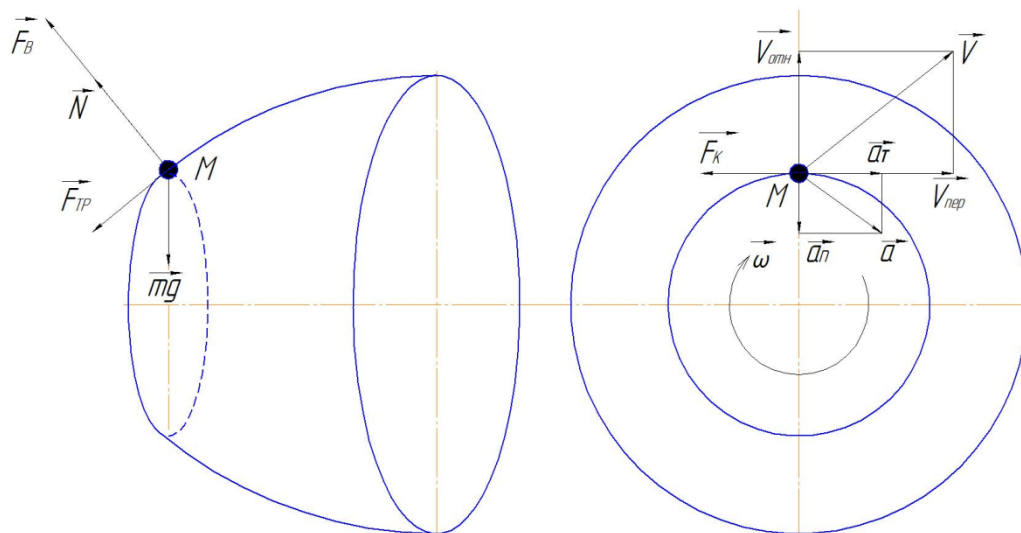


Рис. 3 – Схема сил, действующих на каплю, движущуюся по поверхности вращающейся чаши

$$F_K = -\frac{2\pi d_m^3}{3} \rho_{ж} v_{OTN} n_T \cdot \quad (9)$$

Относительная скорость v_{OTN} капли:

$$v_{OTN} = L_{(R_T - R_0)} n_T \cdot \quad (10)$$

В формуле (10) первый множитель – длина пути, пройденного каплей от основания до кромки вращающегося рабочего элемента.

В момент отрыва от чаши абсолютная скорость полёта капли [14]:

$$v_{АБС} = \sqrt{v_{ПЕР}^2 + v_{ОТН}^2} = n_T \sqrt{4\pi^2 R_T^2 + L_{(R_T - R_0)}^2} \cdot \quad (11)$$

За счёт сил трения F_{TP} , реакции поверхности N и центробежной F_B капля плотно прижимается к стенкам вращающегося элемента распылителя. Поэтому можно утверждать, что его форму определяет угол ϕ капельного факела. Известно, что при работе серийного распылителя $\phi = 45^\circ$.

Для определения угла ϕ вылета капли с поверхности вращающейся чаши были выполнены некоторые геометрические построения (рис. 4).

С учётом данной схемы угол ϕ отрыва капли от кромки вращающейся чаши распылителя:

$$\phi = 90^\circ - \theta = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{R_T}{R_{ш}}\right) = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{2R_T}{\sqrt[3]{h \cdot (3R_T^2 + 3R_0^2 + h^2)}}\right) \cdot \quad (12)$$

где R_0 – радиус основания чаши, м; $R_{ш}$ – радиус шара, м; h – высота шарового слоя, м.

После выполнения расчётов по формуле (12) было установлено, что при работе чашечно-го распылителя $\phi = 18^\circ$.

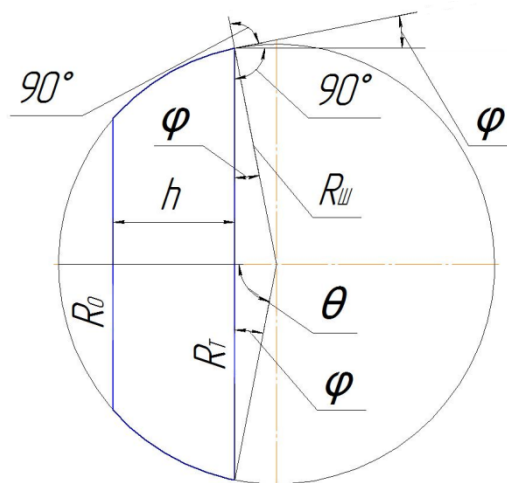


Рис. 4 – Схема чаши вращающегося распылителя

Следует учитывать силу сопротивления встречного воздуха F_A [15, 16]:

$$F_A = \frac{\pi d_m^2}{4} \cdot \frac{\rho_B v_K^2}{2} C_K, \quad (13)$$

где ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; v_K – скорость полёта капли, м/с; C_K – коэффициент аэродинамического сопротивления ($C_K = 0,3$) [17].

После выхода из распылителя капля движется как тело, брошенное под углом к горизонту. Траектория полёта капли определяется координатами x и y :

$$x = v_0 t \cdot \cos \phi; \quad (14)$$

$$y = v_0 t \cdot \sin \phi - \frac{g t^2}{2}. \quad (15)$$

В этих формулах t – время полёта капли, v_0 – её начальная скорость. При достижении

максимальной высоты подъёма у обращается в нуль. Поэтому [17, 18]:

$$t = \frac{2v_0 \cdot \sin \varphi}{g} \quad (16)$$

С учётом уравнений (16) и (14), а также того, что $v_{\text{всг}} = v_{\text{н}}$, а $x = l$ [19]:

$$l = \frac{(4\pi^2 n_T^2 R_T^2 + L_{(R_T - R_0)}^2) \cdot \sin 2\varphi}{g} \quad (17)$$

Для проверки достоверности теоретических зависимостей были проведены экспериментальные исследования малообъёмного опрыскивателя с конусным (рис. 5а) и чашечным (рис. 5б) распылителями.

После лабораторных экспериментов были проведены полевые исследования малообъёмного опрыскивателя с конусным и чашечным вращающимся распылителем на виноградниках. В первом случае капельный факел имеет больший угол при вершине ($\varphi=45^\circ$) и больший радиус поперечного сечения (1,0 м). При этом опрыскиватель охватывает два ряда обрабатываемых растений. При использовании чашечного распылителя капельный факел имеет меньший угол при вершине ($\varphi=18^\circ$) и меньший радиус поперечного сечения (0,65 м). В данном случае опрыскиватель охватывает 3 ряда обрабатываемых растений.

Обсуждение

Полученные экспериментальные данные подтверждают достоверность теоретических зависимостей (12) и (17). При обработке садов целесообразнее использовать конусные вращающиеся распылители. За счёт этого обеспечивается больший угол раскрытия факела и охватывается максимальная площадь обрабатываемого растения. При опрыскивании виноградников целесообразно использовать чашечный вращающийся распылитель. Траектория полёта частиц рабочей жидкости больше направлена прямо, вследствие чего увеличивается дальность полёта частиц рабочей жидкости увеличивается на 3 метра и обеспечивается возможность захвата большего количества рядов виноградника. При выборе радиуса и частоты вращения рабочего элемента вращающегося распылителя следует пользоваться установленными в результате исследований зависимостями. Для проведения малообъёмного опрыскивания рекомендуется устанавливать на распылителе дополнительный (направляющий) рабочий элемент с радиусом кромки $R_T=50$ мм. Частота его вращения должна составлять $n_T=6000$ об/мин. При данных параметрах распылителя обеспечивается наиболее подходящий для малообъёмного опрыскивания многолетних насаждений диаметр капель рабочей жидкости $d_m=100$ мкм [20].

Заключение

Использование результатов исследований при проектировании и регулировке вращающихся распылителей для малообъёмных опрыскивателей обеспечивает правильную организацию и направление потока частиц пестицида. За счёт этого увеличивается густота и равномерность покрытия обрабатываемой поверхности агрохимикатом. Повышается эффективность проведения малообъёмного опрыскивания и производства продукции растениеводства, в частности, садоводства и виноградарства. В случае использования распылителя с рабочими элементами, имеющими радиус кромки $R_T=50$ мм, вращающегося с частотой $n_T=6000$ об/мин, густота покрытия обрабатываемых растений каплями рабочей жидкости увеличивается на 53% по сравнению с серийным распылителем Micron X-1. При этом расход раствора пестицида сокращается в два раза. Серийный распыли-



Рис. 5 – Капельный факел, образуемый конусным (а) чашечным (б) распылителями

тель Micron X-1 обеспечивал норму внесения рабочей жидкости $Q=200$ л/га. При применении предлагаемого чашечного рабочего органа этот показатель составляет $Q=100$ л/га. За счёт большей ширины захвата $B=9$ м и скорости движения во время опрыскивания $V=10$ км/ч обеспечивается повышение производительность агрегата на 2,4 га/час. Одновременно с этим сокращаются затраты рабочей жидкости, топлива и существенно уменьшается нагрузка на окружающую среду.

Библиографический список

1. Догода, П.А. Механизация химической защиты растений / П.А. Догода, С.С. Воложанинов, Н.П. Догода – Симферополь: Таврия, 2000. – 140 с.
2. Санин, В.А. Малообъёмное и ультрамалообъёмное опрыскивание / В.А. Санин. – К.: Урожай, 1978. – 139 с.
3. Сабиров, Р. Ф. Обоснование конструктивно-технологических параметров устройства для обработки семян биопрепаратами / Р. Ф. Сабиров, А. Р. Валиев, Ф. Ф. Мухамадьяров // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16. – № 3(63). – С. 84-89. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-84-89. – EDN RJVVYF.
4. Дунский, В.Ф. Пестицидные аэрозоли / В.Ф. Дунский, Н.В. Никитин, М.С. Соколов. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
5. Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов – М.: Химия, 1984. – 256 с.
6. X-1. Режим доступа https://www.microngroup.com/micron_x-1.
7. Сидоренко, И.Д. Обоснование параметров рабочих органов и режимов работы аэрозольного генератора для химической защиты сельскохозяйственных культур: дис... канд. техн. наук: спец. 05.05.11 / Сидоренко Иван Дмитриевич. – Симферополь, 2014. – 173 с.
8. Шалимова, Е.С. Стационарные и периодические режимы в задаче о движении тяжелой точки по вращающейся сфере при наличии вязкого трения / Е.С. Шалимова // В сборнике: Вестник Московского университета. Математика. Механика. – 2014. – № 4. – С. 43-50.
9. Дунский, В.Ф. Монодисперсные аэрозоли. / В.Ф. Дунский, Н.В. Никитин, М.С. Соколов. – М.: Наука, 1975. – 191 с.
10. Элементы теории образования аэрозолей вращающимися распылителями. Режим доступа <https://mehanik-ua.ru/sbornik-statej/1259-elementy-teorii-obrazovaniya-aerozolej-vrashchayushchimisya-raspylitelyami.html>.
11. Сферическое движение тела. Режим доступа <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1682702907&tld>.
12. Сложное движение. Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/Сложное_движение.
13. Сила Кориолиса. Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/Сила_Кориолиса.
14. Сложное движение твёрдого тела. Режим доступа <https://studfile.net/preview/4114008/page:17/>.
15. Справочник от автор24. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. Режим доступа https://spravochnik.ru/fizika/kinematika/dvizhenie_tela_broshennogo_pod_uglom_k_gorizontu/.
16. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. Режим доступа https://spadilo-ru.turbopages.org/spadilo.ru/s/questions/eb2311/?turbo_feed_type=full.
17. Подъёмная сила. Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/Подъёмная_сила.
18. Движение тела, брошенного под углом к горизонту: физика, построение модели. Режим доступа <https://wiki.fenix.help/fizika/dvizheniye-tela-broshennogo-pod-uglom-k-gorizontu>.
19. Тело бросили под углом к горизонту: скорость, дальность полёта и высота подъёма. Режим доступа <https://nastroy.net/post/telo-brosili-pod-uglom-k-gorizontu-skorost-dalnost-poleta-i-vyisota-podyema>.
20. Сабиров, Р. Ф. Определение дисперсности распыливания рабочего раствора биопрепарата / Р. Ф. Сабиров, А. Р. Валиев, Ф. Ф. Мухамадьяров // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 77-82. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-77-82. – EDN VSYUML.

THEORETICAL BACKGROUND TO SUBSTANTIATION OF THE FORM OF THE ROTATING SPRAYER WORKING ELEMENT

Sidorenko I.D.

Institute "Agrotechnological Academy" (structural subdivision) FSBEI HE "CFU named after V.I. Vernadsky",
245492, r. Crimea, Simferopol, Agraranoe urban settlement, Nauchnaya st., 1A,
tel. +7(978)8139064, vanya.sidorenko.84@mail.ru

Key words: chemical treatment, low-volume sprayer, rotating sprayer, droplet flow, flight path, torch angle, working element.

Based on the results of the design analysis of the existing machines and their working bodies for chemical protection of orchards and vineyards, it was concluded that it is necessary to develop a design of a spraying working body and justify its parameters for more efficient usage of a small-volume sprayer. The process of liquid split into drops by a rotating sprayer was studied. This is fulfilled using the methods and laws of mathematics, kinematics, physics, aerodynamics. Information from the descriptive course on agricultural machines and the basics of the theory of liquid spraying was also studied. A study was conducted of the scheme of forces acting on a drop as it moves along a bowl-shaped surface of rotation. Taking the above into account, a method was developed for calculating the angle of fly-out of a liquid particle from the edge of the bowl for various design and operating parameters of a rotating sprayer. As such parameters, the radii of the edge and the bowl base, the height of the spherical layer that forms its profile, and the rotation frequency of the sprayer were considered. After calculations, a comparison of the schemes for formation of a drip torch during operation of a spraying working body with rotating elements of cone-shaped and bowl-shaped shapes was made. The obtained experimental data confirmed the reliability of the results of the theoretical studies. The usage expediency of rotating sprayer with cone or bowl-shaped working elements of a small-volume sprayer is substantiated. This provides an increase of qualitative and quantitative parameters of the yield of fruit crops and grapes while reducing the cost of agrochemicals, fuel and lubricants, as well as reducing the negative impact on the environment.

Bibliography:

1. Dogoda, P.A. Mechanization of chemical plant protection / P.A. Dogoda, S.S. Volozhaninov, N.P. Dogoda - Simferopol: Tavria, 2000. - 140 p.
2. Sanin, V.A. Low-volume and ultra-low-volume spraying / V.A. Sanin. - K.: Urozhay, 1978. - 139 p.
3. Sabirov, R. F. Substantiation of the design and technological parameters of the device for seed treatment with biological products / R. F. Sabirov, A. R. Valiev, F. F. Mukhamadyarov // Vestnik of Kazan State Agrarian University. - 2021. - V. 16. - № 3 (63). - P. 84-89. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-84-89. – EDN RJVVYF.
4. Dunsky, V.F. Pesticide aerosols / V.F. Dunsky, N.V. Nikitin, M.S. Sokolov. – M.: Nauka, 1982. – 288 p.
5. Pazzi, D.G. Fundamentals of liquid spraying technique / D.G. Pazzi, V.S. Galustov - M.: Chemistry, 1984. - 256 p.
6. X-1. Access mode https://www.microngroup.com/micron_x-1.
7. Sidorenko I.D. Substantiation of the parameters of the working bodies and modes of operation of an aerosol generator for chemical protection of agricultural crops: thesis of candidate of technical sciences: spec. 05.05.11 / Sidorenko Ivan Dmitrievich. - Simferopol, 2014. - 173 p.
8. Shalimova, E.S. Stationary and periodic regimes in the problem of the motion of a heavy point along a rotating sphere in the presence of viscous friction / E.S. Shalimova // In the collection: Vestnik of Moscow University. Mathematics. Mechanics. - 2014. - № 4. - P. 43-50.
9. Dunskiy, V.F. monodisperse aerosols. / V.F. Dunsky, N.V. Nikitin, M.S. Sokolov. – M.: Nauka, 1975. – 191 p.
10. Elements of the theory of aerosol formation by rotating sprayers. Access mode <https://mehanic-ua.ru/sbornik-statej/1259-elementy-teorii-obrazovaniya-aerozolej-vrashchayushchimisya-raspy litelyami.html>.
11. Spherical motion of the body. Access mode <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1682702907&tld>.
12. Complex movement. Access mode https://ru.wikipedia.org/wiki/Complex_movement.
13. Coriolis force. Access mode https://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_force.
14. Complex motion of a rigid body. Access mode <https://studfile.net/preview/4114008/page:17/>.
15. Reference book from author24. The motion of a body thrown at an angle to the horizon. Access mode https://spravochnik.ru/fizika/kinematika/dvizhenie_tela_broshennogo_pod_uglom_k_gorizontu/.
16. Movement of a body thrown at an angle to the horizon. Access mode https://spadilo-ru.turbopages.org/spadilo.ru/s/questions/eb2311/?turbo_feed_type=full.
17. Lifting force. Access mode https://ru.wikipedia.org/wiki/Lift_force.
18. Movement of a body thrown at an angle to the horizon: physics, building a model. Access mode <https://wiki.fenix.help/fizika/dvizheniye-tela-broshennogo-pod-uglom-k-gorizontu>.
19. The body was thrown at an angle to the horizon: speed, flight range and height of ascent. Access mode <https://nastroy.net/post/telo-brosili-pod-uglom-k-horizontu-skorost-dalnost-poleta-i-vysota-podyema>.
20. Sabirov, R. F. Specification of spraying dispersity of the working solution of a biological product / R. F. Sabirov, A. R. Valiev, F. F. Mukhamadyarov // Vestnik of Kazan State Agrarian University. - 2022. - V. 17. - № 1 (65). - P. 77-82. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-77-82. – EDN VSYUML.