УДК 667.6: 532.542.2

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-83-92

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ КОНСЕРВАЦИОННОГО СОСТАВА

¹*Петрашев Александр Иванович**¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»*

Реферат. Известно, что производительность консервации сельскохозяйственных машин зависит от применяемого оборудования и расхода наносимого консервационного состава. Установлено, что эффективная вязкость тиксотропного консервационного состава понижается в процессе его течения из напорного бака в краскораспылитель. Это происходит из-за механического разрушения структур состава под давлением нагнетания. Показано, что невысыхающие консервационные составы на масляной основе формируют покрытие за счет повышения их эффективной вязкости вследствие структурных изменений в нанесенной пленке. Предложен метод определения тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расхода состава при двух значениях давления нагнетания с последующим расчетом показателя расхода по предлагаемой формуле. Если показатель расхода меньше единицы, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами, он может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если показатель расхода больше единицы, то предлагается повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава. Скорректировано уравнение для определения давления нагнетания консервационного состава. В этом уравнении учитывается гидравлическое сопротивление в шланге подачи и в сопле краскораспылителя. Получена эмпирическая формула для расчета потерь давления в сопле краскораспылителя. В этой формуле учитываются влияния вязкости и скоростного напора на потери давления. Установлена зависимость расхода состава от его вязкости и плотности, от давления нагнетания, диаметра сопла, длины и диаметра шланга. Показано, что при уменьшении длины шланга в 2 раза расход состава повышается на 64 %, а при увеличении его диаметра в 1,2 раза – на 67 %. Эти данные рекомендуется использовать при разработке оборудования для нанесения консервационных покрытий на рабочие органы сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: консервационное оборудование, тиксотропный состав, гидравлическое сопротивление, потери давления.

HYDRAULIC BASES OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR APPLICATION OF CONSERVATION COMPOSITION

¹*Petrashev Alexandr**¹FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"*

Abstract. It known that the performance of conservation of agricultural machines depends on the equipment used and the consumption of the applied conservation composition. It been established that the effective viscosity of the thixotropic preservation composition decreases during its flow from the pressure tank to the paint sprayer. This is due to the mechanical destruction of the structure of the composition under discharge pressure. It been shown that non-drying, oil-based preservation compositions form a coating by increasing their effective viscosity due to structural changes in the deposited film. A method for determining the thixotropic of compositions obtained by introducing an additive into an oil base proposed. The method consists in measuring the flow rate of the composition at two discharge pressures with the subsequent calculation of the flow rate using the proposed formula. If the flow rate is less than unity, then the studied composition has thixotropic properties, it can held on vertical surfaces. If the flow rate is greater than unity, it proposed to increase the concentration of the thickening additive in the oil-based composition. The equation for determining the discharge pressure of the preservation composition been adjusted. The hydraulic resistance in the feed hose and in the nozzle of the spray gun taken into

account in this equation. The empirical formula for calculating the pressure loss in the nozzle of the spray gun obtained. The effect of viscosity and pressure head on pressure loss taken into account in this formula. The dependence of the flow rate of the composition on its viscosity and density, on the discharge pressure, nozzle diameter, hose length and diameter been established. It was shown that the consumption of the composition increases by 64% with a decrease in the length of the hose by 2 times, and with an increase in its diameter by 1.2 times - by 67%. These data recommended using when developing equipment for applying conservation coatings to the working bodies of agricultural machinery.

Keywords: preservation equipment, thixotropic composition, hydraulic resistance, pressure loss.

Введение. Необходимость защиты сельскохозяйственной техники консервационными покрытиями на срок до 10 месяцев вызвана сезонностью ее эксплуатации и длительным бездействием [1, 2]. Сменная производительность консервации определяется количеством машин, рабочие органы которых покрывают защитным составом в течение 1 ч сменного времени:

$$W_{\text{см}} = \frac{n_{\text{см}}}{t_{\text{см}}},$$

где $W_{\text{см}}$ – сменная производительность консервации (шт/ч); $n_{\text{см}}$ – количество машин одной марки, защищенных в течение смены, шт; $t_{\text{см}}$ – длительность смены, ч.

Сменная производительность нанесения консервационного покрытия на машины одной марки за 1 ч сменного времени:

$$B_{\text{см}} = S_1 \cdot W_{\text{см}},$$

где $B_{\text{см}}$ – сменная производительность нанесения консервационного покрытия, м²/ч; S_1 – покрываемая составом площадь поверхности рабочих органов одной машины, м²/шт.

Сменная производительность $B_{\text{см}}$ нанесения консервационного покрытия зависит от технической (часовой) производительности $B_{\text{т.ч}}$ применяемого консервационного оборудования, а также от формы поверхностей рабочих органов машины и других эксплуатационно-технологических факторов, учитываемых коэффициентом $K_{\text{и}}$ технологического использования оборудования:

$$B_{\text{см}} = B_{\text{т}} \cdot K_{\text{и}},$$

где $B_{\text{т}}$ – техническая (часовая) производительность оборудования для нанесения консервационного покрытия, м²/ч; $K_{\text{и}}$ – коэффициент технологического использования оборудования.

Коэффициент $K_{\text{и}}$ технологического использования консервационного оборудования [3] представляет собой отношение сменной производительности нанесения консервационного покрытия к технической производительности оборудования:

$$K_{\text{и}} = \frac{B_{\text{см}}}{B_{\text{т}}}.$$

В таблице 1 показаны реальные значения производительности навесной установки УПХН-50 [4], полученные при нанесении консервационного состава Ингибит-С. Эти результаты приведены в протоколе № 8-44-96 (4200152) государственных приемочных испытаний установки на Поволжской МИС. Во время испытаний установки состав Ингибит-С подавали из напорного бака по шлангу и наносили посредством пневматического краскораспылителя СО-71.

Таблица 1 – Эксплуатационно-технологические показатели для установки УПХН-50

Показатель	Значение при консервации техники				
	ПЛН-8-40	КПС-4	КСМ-4	Дон-1500	СЗП-3,6
Объем работы, шт	6	9	5	7	9
Производительность $W_{\text{см}}$ консервации за 1 ч времени смены, шт/ч	7,8	4,6	2,6	0,9	1,8
Производительность нанесения, м ² /ч:					
- техническая, $B_{\text{т}}$	192	192	192	192	192
- за 1 ч времени смены, $B_{\text{см}}$	32,4	31,2	26,4	23,4	24,6
Коэффициент $K_{\text{и}}$ технологического использования оборудования	0,17	0,16	0,14	0,12	0,13

Как видно из таблицы 1, значения коэффициентов технологического использования консервационного оборудования зависели от вида консервируемых машин и находилась в интервале $0,17 \geq K_n \geq 0,12$, в среднем $K_{н.ср} = 0,14$.

Техническая (секундная) производительность $B_{т.с}$ оборудования определялась по времени нанесения покрытия краскораспылителем на плоский лист:

$$B_{т.с} = \frac{S_n}{t_n},$$

где S_n – площадь плоского листа, m^2 ; t_n – время нанесения покрытия, с.

Скорость U_p (м/с) перемещения факела краскораспылителя в процессе окраски листа влияет на техническую производительность оборудования:

$$B_{т.с} = U_p D (1 - k_n), \quad (1)$$

где D – ширина (диаметр) факела распыла, м; k_n – коэффициент перекрытия смежных полос при нанесении покрытия, $k_n = 0,25-0,3$.

По эргономическим требованиям скорость U_p перемещения факела краскораспылителя должна быть $0,23-0,3$ м/с для того, чтобы иметь оптимальную производительность и качество технологического процесса нанесения. При этом расход состава через краскораспылитель следует определять с учетом рекомендуемой величине удельного расхода:

$$Q_k = B_{т.с} \cdot m_k, \quad (2)$$

где Q_k – расход состава (по массе), кг/с; m_k – удельный расход состава на $1 m^2$ поверхности, $кг/м^2$.

Чтобы получить номинальную толщину защитного слоя и для экономичности технологического процесса нанесения покрытия, удельный расход m_k состава должен соответствовать нормативной величине A_r :

$$m_k = \frac{k_n A_r}{1000}, \quad (3)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий потери состава при нанесении, для пневматического краскораспылителя $k_n = 1,2-1,3$; A_r – норматив расхода состава, $г/м^2$; 1000 – число для перевода норматива расхода из ($г/м^2$) в ($кг/м^2$).

Из выражений (1), (2) и (3) получена зависимость расхода Q_r состава (г/с) через краскораспылитель, учитывающая технологические факторы (D , U_p , k_n), необходимый уровень защиты (A_r) и экономичность (k_n) процесса нанесения:

$$Q_r = k_n A_r \cdot U_p \cdot D (1 - k_n). \quad (4)$$

Для скорости $U_p = 0,3$ м/с, коэффициентов $k_n = 1,25$ и $k_n = 0,25$, ширины факела $D = 0,1$ м, нормативов расхода $A_r = 70-360$ $г/м^2$ определены значения возможных расходов составов при нанесении пневматическими краскораспылителями: $Q_r = 2-10$ г/с. Анализ технических характеристик пневматических краскораспылителей показал, что максимальный уровень расхода состава достигается при работе краскораспылителя с напорным баком. Для краскораспылителя КРП-11 величина расхода состава – 6 г/с, для краскораспылителя СО-71 – 11 г/с.

Экспериментальные гидравлические исследования. Для того чтобы подать состав из напорного бака в краскораспылитель с расходом не ниже Q_r , необходимо в бак ввести сжатый воздух с давлением нагнетания P . Энергия давления сжатого воздуха расходуется в процессе течения состава на преодоление им гидравлических сопротивлений в напорной магистрали, включающей шланг, патрубки и штуцеры, а также в канале и сопле краскораспылителя. Гидравлические потери давления зависят как от геометрических параметров напорной магистрали и краскораспылителя, так и от реологических свойств консервационного состава.

Исследование реологические свойства консервационных составов, полученных из отходов нефтепереработки, обычно состоит из определения зависимости их вязкости от температуры и концентрации компонентов [5]. Тиксотропность относится к одному из самых важных свойств невымывающихся консервационных покрытий на основе отработанных масел. Если использовать высушающие защитные составы, то нанесенное покрытие формируется за счет повышения вязкости при испарении растворителей. В случае применения невымывающихся составов на масляной основе – за счет повышения эффективной вязкости в результате структурных изменений в нанесенной пленке.

Связь давления нагнетания с расходом состава может быть установлена экспериментально с привлечением формулы Ньютона, приведенной в работе [6]:

$$P_n = Bq^2 + Dq. \quad (5)$$

где P_n – давление нагнетания, МПа; q – расход состава по объему, мл/с ($\text{см}^3/\text{с}$); B – квадратичный коэффициент давления, МПа/(мл/с)²; D – линейный коэффициент давления, МПа/(мл/с).

Расход состава по объему q (мл/с) связан с расходом состава по массе Q_r (г/с) формулой:

$$q = \frac{Q_r}{\rho} = \frac{Q_r}{0,001\rho_k}.$$

где ρ – плотность состава, измеренная в г/см³; ρ_k – плотность состава, измеренная в кг/м³.

Коэффициенты (B) и (D) учитывают суммарное влияние конструктивных параметров оборудования и реологических свойств состава на падение давления в напорной магистрали и сопле краскораспылителя. Коэффициенты рассчитывают по данным двух опытов, при которых измеряют давления P_1 и P_2 нагнетания и соответствующие им расходы q_1 и q_2 :

$$B = \frac{P_2 q_1 - P_1 q_2}{q_1 q_2 (q_2 - q_1)}, \quad D = \frac{P_1 q_2^2 - P_2 q_1^2}{q_1 q_2 (q_2 - q_1)}. \quad (6)$$

Авторы работы [7] приводят степенную эмпирическую формулу, связывающую давление нагнетания с расходом жидкости:

$$P_c = Kq^b, \quad (7)$$

где P_c – давление нагнетания, МПа; K – степенной коэффициент давления, МПа/(мл/с); b – показатель расхода.

Показатель b расхода и степенной коэффициент K давления устанавливают экспериментальным путем по данным 2-х опытов:

$$b = \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(q_2/q_1)}; \quad K = \frac{P_1}{q_1^b}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов давления определяли опытным путем при подаче состава из напорного бака по шлангу $d_{\text{ш}} = 9$ мм длиной $L_{\text{ш}} = 9$ м через открытое сопло краскораспылителя СО-71. В качестве экспериментального состава использовали индустриальное масло И-20А, вязкость которого изменяли добавлением кубовых аминов (загущение) или уайт-спирита (разжижение). Вязкость состава измеряли на вискозиметрах типа ВЗ-4 ($\nu_{\text{ус}}$ – условная, секунды) и ВНЖ (ν – кинематическая, мм²/с). Полученные результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные по расходу состава

Вязкость состава		Давление нагнетания, P , МПа				
кинематическая, ν , мм ² /с	условная, $\nu_{\text{ус}}$, с ВЗ-4	0,02	0,04	0,06	0,1	0,2
		Расход состава, q , мл/с				
22	14	26	37	-	-	-
60	21	-	12,6	16,6	24	-
227	52	-	7	-	17,5	34
432	90	-	-	4	7,2	15

Там, где на одной вязкости состава выполнено по 3 опыта, то коэффициенты давления рассчитывали по данным первого и второго, второго и третьего опытов. Получив значения коэффициентов, вычисляли их среднюю геометрическую величину, например, $B = (B_1 \cdot B_2)^{0,5}$. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов давления

Вязкость состава кинематическая ν , мм ² /с	Квадратичный коэффициент, B , МПа/(мл/с) ²	Линейный коэффициент, D , МПа/(мл/с)	Показатель расхода, b	Степенной коэффициент, K , МПа/(мл/с)
22	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	1,96	$0,035 \cdot 10^{-3}$
60	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	1,43	$1,08 \cdot 10^{-3}$
227	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-3}$	1,02	$5,39 \cdot 10^{-3}$
432	$-16,0 \cdot 10^{-5}$	$15,39 \cdot 10^{-3}$	0,91	$16,75 \cdot 10^{-3}$

По результатам вычислений установлено, что при загущении масла кубовыми аминами и увеличении его вязкости до 432 мм²/с, линейный коэффициент (Д) давления повысился, а квадратичный коэффициент (Б) принял отрицательное значение. Отрицательная величина квадратичного коэффициента (Б) противоречила известным закономерностям течения ньютоновской жидкости. Аномальное изменение коэффициента (Б) свидетельствовало о проявлении свойств структурированной жидкости у экспериментального состава при повышении концентрации кубовых аминов. Отрицательное значение коэффициента (Б) для структурированного состава имело место при условии:

$$P_2 q_1 - P_1 q_2 < 0.$$

Для этого условия справедливо неравенство:

$$1 < \frac{P_2}{P_1} < \frac{q_2}{q_1}. \quad (9)$$

Так как отношения обеих сторон неравенства (9) больше единицы, то при вычитании из них единицы знак неравенства не меняется:

$$\frac{P_2}{P_1} - 1 < \frac{q_2}{q_1} - 1.$$

Отсюда получаем

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} < \frac{q_2 - q_1}{q_1}, \quad \text{далее} \quad \frac{\Delta P}{P_1} < \frac{\Delta q}{q_1},$$

где ΔP – прирост давления, МПа; Δq – прирост расхода, мл/с.

Таким образом, при подаче структурированного тиксотропного состава из напорного бака на распыление, относительный прирост расхода ($\Delta q/q_1$) состава через краскораспылитель опережает относительный прирост давления ($\Delta P/P_1$) в баке. Это связано с понижением эффективной вязкости состава в результате механического разрушения образующихся структур при повышении давления нагнетания от P_1 до P_2 .

С ростом вязкости состава от 22 до 227 мм²/с (в 10 раз) отмечалось увеличение степенного коэффициента K давления в 154 раза и снижение показателя b расхода от 1,96 до 1,02. При отрицательных значениях квадратичного коэффициента $B = -16,0 \cdot 10^{-5}$ МПа/(мл/с)² величина показателя расхода опустилась ниже единицы: $b = 0,92$. Приведенные данные показывают взаимосвязь коэффициентов B, D с показателем b .

Для определения диапазона изменений показателя b расхода, сравним формулы (5) и (7). На рисунке 1 в виде точек нанесены экспериментальные данные из таблицы 2 и проведены графики давлений, исчисленные по формулам (5) и (7).

Рисунок 1 – Эмпирические зависимости давления (P) нагнетания от расхода (q) состава при вязкости ν : 1 – 22 мм²/с; 2 – 60 мм²/с; 3 – 227 мм²/с; 4 – 432 мм²/с

Так как графики в границах опытных данных практически накладываются друг на друга, то допустимо считать, что обе формулы адекватно описывают экспериментальную связь давлений P_n

и P_c с расходом q состава. Исходя из равенства рассчитанных давлений ($P_n = P_c$), приравняем выражения (5) и (7):

$$Kq^b = Bq^2 + Dq \quad \text{или} \quad Kq^{b-1} = Bq + D. \quad (10)$$

Решим уравнение (10) относительно показателя b по данным двух опытов:

$$b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{Bq_2 + D}{Bq_1 + D}\right)}{\ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right)}. \quad (11)$$

По данным таблицы 3 для маловязкого состава ($\nu = 22 \text{ мм}^2/\text{с}$) линейный коэффициент давления $D = 3,07 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}/(\text{мл}/\text{с})$, что намного ниже произведения $Bq_1 = 78 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}/(\text{мл}/\text{с})$, т.е. $D \ll Bq_1$. Поэтому допустима запись:

$$\ln\left(\frac{Bq_2 + D}{Bq_1 + D}\right) \approx \ln\left(\frac{Bq_2}{Bq_1}\right) = \ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right). \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в (11), найдем максимальное значение показателя расхода для маловязких составов: $b_{n,\max} \rightarrow 2,0$.

Для вязкого состава ($\nu = 227 \text{ мм}^2/\text{с}$) линейный коэффициент давления $D = 562,1 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}/(\text{мл}/\text{с})$ намного выше произведения $Bq_2 = 17 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}/(\text{мл}/\text{с})$, т.е. $D \gg Bq_2$. В этом случае допустима запись:

$$\ln\left(\frac{Bq_2 + D}{Bq_1 + D}\right) \approx \ln\left(\frac{D}{D}\right) = 0. \quad (13)$$

Подставив выражение (13) в (11), найдем минимальное значение показателя расхода для вязких составов: $1,0 \leftarrow b_{n,\min}$. Проведенным исследованием установлено, что показатели расхода b_n консервационных составов, проявляющих свойства ньютоновской жидкости, могут иметь значения в диапазоне: $1,0 < b_n < 2,0$.

Показатель расхода b_t для структурированного состава определим с учетом неравенства (9), при котором:

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) < \ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right). \quad (14)$$

Подставив выражение (14) в формулу (8), найдем область определения значений показателя расхода структурированных тиксотропных составов: $b_t < 1,0$. По данным опытов, показатели расхода b_t тиксотропных консервационных составов со свойствами неньютоновской структурированной жидкости были действительны в диапазоне: $0,9 \leq b_t < 1,0$.

Выполненные исследования позволили предложить метод выявления тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расходов (q_1, q_2) состава при двух значениях давления нагнетания (P_1, P_2). При этом состав подается из нагнетательного бака через шланг и краскораспылитель в мерный цилиндр без распыления. После проведения опытов рассчитывается показатель b расхода по формуле (8). Если значение $b < 1,0$, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами и может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если $b > 1,0$, то необходимо повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава.

Экспериментально-аналитическая оценка расхода состава и потерь давления нагнетания в консервационном оборудовании. Формула (7) представляется более удобной для определения взаимосвязи расхода q состава с давлением P его нагнетания из напорного бака. Однако, эмпирические зависимости, рассчитанные по формуле (7), являются частными и применимы только для конкретных конструктивных параметров оборудования и реологических характеристик состава. Любые изменения вязкости состава, длины или диаметра шланга сопряжены с проведением новых экспериментальных исследований.

В работах [8, 9] приводится обобщенная формула для расчета давления нагнетания консервационного состава, а также результаты оценки гидравлических сопротивлений напорной магистрали и краскораспылителя. Авторами было установлено, что при расходе состава $6 \text{ г}/\text{с}$, примерно 95 % гидравлических потерь давления приходится на шланг длиной 10 м и на сопло распылителя. Полученные результаты позволяют упростить обобщенную формулу, исключив из нее расчеты малозначимых потерь давления в патрубках, штуцерах и каналах краскораспылителя.

Малозначимую часть потерь предлагается учитывать повышающим коэффициентом – 1,1, а расчет давления нагнетания P_k (Па) вести по приведенной формуле:

$$P_k = 1,1(\Delta P_{ш} + \Delta P_c), \quad (15)$$

где $\Delta P_{ш}$ – потери давления в шланге, Па; ΔP_c – потери давления при истечении состава из сопла краскораспылителя, Па.

При расходе состава q_k ($\text{м}^3/\text{с}$) потери давления в шланге рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{ш} = \frac{2q_k \rho_k v_k}{\pi} (\lambda \cdot \text{Re}) \frac{L_{ш}}{d_{ш}^4}, \quad (16)$$

где $L_{ш}$, $d_{ш}$ – длина и диаметр шланга, м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; Re – число Рейнольдса для шланга; v_k – вязкость состава кинематическая, $\text{м}^2/\text{с}$.

В источнике [10] для гидравлических расчетов маслопроводов рекомендована величина произведения $(\lambda \cdot \text{Re}) = 75$. С учетом этой рекомендации уточнена формула (16):

$$\Delta P_{ш} = 150q_k \rho_k v_k \cdot \frac{L_{ш}}{\pi d_{ш}^4}, \quad (17)$$

Потери давления при истечении состава из сопла рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_c = \frac{8q_k^2 \rho_k}{\mu^2 \pi^2 d_c^4} = \frac{2q_k v_k \rho_k \text{Re}_c}{\mu^2 \pi d_c^3}, \quad (18)$$

где Re_c – число Рейнольдса для сопла; d_c – диаметр сопла, м; μ – коэффициент расхода.

Число Рейнольдса Re_c определяется по формуле:

$$\text{Re}_c = \frac{4q_k}{\pi d_c v_k}.$$

Результаты исследования процесса истечения консервационных составов через сопла краскораспылителей отражены на рисунке 2.

Рисунок 2 – Связь коэффициента расхода ($1/\mu^2$) с числом Рейнольдса (Re_c)

При обработке полученных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента расхода состава через сопло от числа Рейнольдса:

$$\frac{1}{\mu^2} = \frac{60}{\text{Re}_c} + 1,7. \quad (19)$$

Подставляем зависимость (19) в формулу (18):

$$\Delta P_c = 120q_k v_k \rho_k \cdot \frac{d_c}{\pi d_c^4} + \frac{13,6q_k^2 \rho_k}{\pi^2 d_c^4}, \quad (20)$$

В формуле (20) первое слагаемое учитывает влияние вязкости на потери давления по длине сопла, равнозначной его диаметру. Полагаем, что второе слагаемое в определенной мере учитывает затраты давления в сопле на увеличение кинетической энергии истекающего состава. Для проверки этого предположения определим давление P_n скоростного напора состава на выходе из сопла краскораспылителя:

$$P_n = \frac{\alpha u_c^2 \rho_k}{2} = \frac{8\alpha q_k^2 \rho_k}{\pi^2 d_c^4}, \quad (21)$$

где α – коэффициент кинетической энергии; u_c – средняя скорость струи на выходе из сопла, м/с.

Сравнением выражения (21) со вторым слагаемым формулы (20), определим опытное значение коэффициента кинетической энергии для сопла: $\alpha = 1,7$. Значение коэффициента кинетической энергии соответствует ламинарному режиму течения состава: $1,05 \leq \alpha \leq 2$ [7, с. 101].

Подставляем выражения (17) и (20) в (15) и после преобразований получаем уравнение, устанавливающее зависимость давления нагнетания от расхода состава, его вязкости и плотности, длины и диаметра шланга, диаметра сопла краскораспылителя:

$$P_k = 165 \frac{q_k \rho_k v_k L_{ш}}{\pi d_{ш}^4} + 132 \frac{q_k \rho_k v_k}{\pi d_c^3} \left(1 + \frac{0,113 q_k}{\pi d_c v_k} \right). \quad (22)$$

В первом слагаемом уравнения (22) учитывается влияние параметров шланга, а во втором – сопла. Для графической интерпретации этого уравнения зададим значения входящих в него показателей: плотность состава $\rho_k = 9 \cdot 10^2$ кг/м³ (0,9 г/мл); кинематическая вязкость $v_k = 4 \cdot 10^{-4}$ м²/с (400 мм²/с); длина шланга $L_{ш} = 10$ м; его диаметр $d_{ш} = 10^{-2}$ м (10 мм); диаметр сопла $d_c = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м (1,8 мм); диапазон изменения расхода $q_k = (2-10) \cdot 10^{-6}$ м³/с (2-10 мл/с). Результаты расчета, отражающие влияние расхода q состава на потери давления в шланге ($\Delta P_{ш}$), сопле (ΔP_c) и суммарно (P_k), показаны на рисунке 3.

Рисунок 3 – Зависимость потерь давления нагнетания (ΔP_c , $\Delta P_{ш}$, P_k) от расхода (q) состава

Из рисунка 3 видно, что при увеличении расхода состава в 5 раз (от 2 до 10 мл/с) суммарные потери давления нагнетания P_k возросли в 5,3 раза (от 43 до 230 кПа). Опережающий темп прироста потерь давления (ΔP_c) в сопле обусловлен наличием слагаемого с квадратичной зависимостью от расхода.

Для установления влияния параметров процесса нагнетания состава на его расход, используем уравнение (22), в котором параметры сгруппируем по показателям степени расхода:

$$P_k = \frac{\rho_k}{\pi} \left(\frac{15}{\pi d_c^4} \right) q_k^2 + \frac{\rho_k}{\pi} \left(\frac{165 v_k L_{ш}}{d_{ш}^4} + \frac{132 v_k}{d_c^3} \right) q_k,$$

и представим его в виде квадратичного уравнения:

$$\left(\frac{15}{\pi d_c^4} \right) q_k^2 + v_k \left(\frac{165 L_{ш}}{d_{ш}^4} + \frac{132}{d_c^3} \right) q_k - \frac{\pi P_k}{\rho_k} = 0. \quad (23)$$

Действительным корнем решения квадратичного уравнения (23) является выражение:

$$q_k = \frac{\pi d_c^4}{15} \left(\sqrt{v_k^2 \left(\frac{82,5 L_{ш}}{d_{ш}^4} + \frac{66}{d_c^3} \right)^2 + \frac{15}{d_c^4} \cdot \frac{P_k}{\rho_k}} - v_k \left(\frac{82,5 L_{ш}}{d_{ш}^4} + \frac{66}{d_c^3} \right) \right),$$

которое представим в виде, удобном для расчетов:

$$q_k = \pi \left[\sqrt{v_k^2 \left(5,5 L_{ш} \frac{d_c^4}{d_{ш}^4} + 4,4 d_c \right)^2 + \frac{P_k d_c^4}{15 \rho_k}} - v_k \left(5,5 L_{ш} \frac{d_c^4}{d_{ш}^4} + 4,4 d_c \right) \right]. \quad (24)$$

Формула (24) устанавливает зависимость расхода q_k (м³/с) состава от его вязкости v_k (м²/с) и

плотности ρ_k (кг/м³), от давления нагнетания P_k (Па), диаметра сопла d_c (м), длины $L_{ш}$ (м) и диаметра $d_{ш}$ (м) шланга. Из анализа зависимости (24) просматривается прямая связь расхода состава только с давлением нагнетания. Степень влияния других параметров уравнения (24) на расход q состава выражена не явно. Для того, чтобы ее раскрыть, были проведены вычисления, результаты которых представлены на рисунке 4 в виде графиков зависимости расхода q состава от давления P_k нагнетания.

График q_1 характеризует расход состава для базовых значений параметров: $L_{ш} = 10$ м, $d_{ш} = 10$ мм, $d_c = 1,8$ мм; $\nu_k = 400$ мм²/с. При давлении нагнетания $P_k = 200$ кПа базовый расход состава $q_1 = 8,8$ мл/с.

График q_2 показывает увеличение расхода при увеличении диаметра сопла относительно базового с 1,8 до 2,5 мм (рост площади сечения в 1,93 раза). При давлении $P_k = 200$ кПа расход состава повысился до $q_2 = 9,9$ мл/с, то есть возрос на 12,5 % в сравнении с базовым расходом.

Рисунок 4 – Изменение расхода (q)состава в зависимости от давления нагнетания (P_k):

q_1 – для базовых значений параметров сопла, шланга и вязкости состава; q_2 – при увеличении площади сечения сопла в 1,93 раза; q_3 – при уменьшении длины шланга в 2 раза; q_4 – при увеличении площади сечения шланга в 1,44 раза; q_5 – при уменьшении вязкости состава в 2 раза

График q_3 показывает увеличение расхода при уменьшении длины шланга относительно базовой с 10 до 5 м (в 2 раза). При давлении $P_k = 200$ кПа расход состава повысился до $q_3 = 14,4$ мл/с, т.е. возрос на 63,6 % в сравнении с базовым.

График q_4 показывает увеличение расхода при увеличении диаметра шланга относительно базового с 10 до 12 мм (рост площади сечения шланга в 1,44 раза). При давлении $P_k = 200$ кПа расход состава повысился до $q_3 = 14,7$ мл/с, то есть возрос на 67 % в сравнении с базовым.

График q_5 показывает увеличение расхода при уменьшении вязкости состава относительно базовой с 400 до 200 мм²/с (в 2 раза). При давлении $P_k = 200$ кПа расход состава повысился до $q_3 = 15,6$ мл/с, то есть возрос на 77,3 % в сравнении с базовым.

Анализ представленных графиков позволил выявить существенный резерв повышения подачи вязких составов на распыление (в 1,67 раза) за счет незначительного (в 1,2 раза) увеличения диаметра шланга.

Заключение. Производительность консервации сельхозмашин зависит от технических возможностей применяемого оборудования и расхода наносимого консервационного состава. При подаче тиксотропного консервационного состава из напорного бака на распыление эффективная вязкость состава понижается из-за механического разрушения образующихся структур в результате увеличения давления нагнетания. Невысыхающие консервационные составы на масляной основе формируют покрытие за счет последующего повышения эффективной вязкости вследствие структурных изменений в нанесенной пленке.

На основе выполненных исследований предложен метод установления тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расхода состава при двух значениях давления нагнетания с последующим расчетом показателя расхода по предлагаемой формуле. Если показатель меньше единицы, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами и может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если показатель больше единицы, то необходимо повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава.

Скорректировано уравнение для определения давления нагнетания консервационного состава, учитывающее гидравлическое сопротивление течению состава в шланге подачи и в сопле краскораспылителя. Получена эмпирическая формула для расчета потерь давления в сопле краскораспылителя с учетом влияния вязкости и скоростного напора истекающего состава. Установлена зависимость расхода состава от его вязкости и плотности, от давления нагнетания, диаметра сопла, длины и диаметра шланга. Показано, что при уменьшении длины шланга в 2 раза расход состава увеличивается на 64 %, а при увеличении его диаметра в 1,2 раза – на 67 %.

Список литературы

1. Кузьмин В.Н., Федоренко В.Ф., Мишунов Н.П. и др. Справочник фермера М.: Изд-во «Росинформагротех», 2017. 708 с.
2. Петрашев А.И. Пневматическая установка для нагрева и распыления вязких красок и мастик в условиях АПК // Практика противокоррозионной защиты. 2001. № 4 (22). С. 23-26.
3. Петрашев А.И., Князева Л.Г., Клепиков В.В. Технологические решения по консервации сельскохозяйственной техники отработанными моторными маслами // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 112. № 2. С. 61-65.
4. Петрашев А.И., Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Ивойлов А.А. Совершенствование навесных средств консервации машин // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 6. С. 49-51.
5. Корякина М.И. Испытания лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1988. 272 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 832 с.
7. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.
8. Петрашев А.И. Распределение гидравлических потерь давления в напорной магистрали при течении консервационной жидкости // Наука в центральной России. 2018. № 2. С. 92-100.
9. Губашева А.М. Разработка технологии консервации тукообразующих машин с обоснованием параметров агрегата для нанесения защитных составов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Губашева Алмагуль Мустафаевна. Мичуринск. 2018. 23 с.
10. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод. М.: Недра, 1991. 331 с.

References

1. Kuz'min V.N., Fedorenko V.F., Mishurov N.P. i dr. Spravochnik fermera. M.: Izd-vo «Rosinformagrotekh», 2017. 708 s.
2. Petrashev A.I. Pnevmaticheskaya ustanovka dlya nagreva i raspyleniya vyazkih krasok i mastik v usloviyah APK // Praktika protivokorroziionnoj zashchity. 2001. № 4 (22). S. 23-26.
3. Petrashev A.I., Knyazeva L.G., Klepikov V.V. Tekhnologicheskie resheniya po konservacii sel'skohozyajstvennoj tekhniki otrabotannymi motornymi maslami // Trudy GOSNITI. 2013. T. 112. № 2. S. 61-65.
4. Petrashev A.I., Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ivojlov A.A. Sovershenstvovanie navesnyh sredstv konservacii mashin // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 2008. № 6. S. 49-51.
5. Koryakina M.I. Ispytaniya lakokrasochnyh materialov i pokrytij. M.: Himiya, 1988. 272 s.
6. Lojcyanskij L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka, 1973. 832 s.
7. Shterenliht D.V. Gidravlika. M.: Energoatomizdat, 1984. 640 s.
8. Petrashev A.I. Raspredelenie gidravlicheskih poter' davleniya v napornoj magistrali pri techenii konservacionnoj zhidkosti // Nauka v central'noj Rossii. 2018. № 2. S. 92-100.
9. Gubasheva A.M. Razrabotka tekhnologii konservacii tukorazbrasyvayushchih mashin s obosnovaniem parametrov agregata dlya naneseniya zashchitnyh sostavov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03 / Gubasheva Almagul' Mustafaevna. Michurinsk. 2018. 23 s.
10. Gejer V.G., Dulin V.S., Zarya A.N. Gidravlika i gidroprivod. M.: Nedra, 1991. 331 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Петрашев Александр Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Petrashev Alexandr – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 24.03.2020

Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020