

*В. Г. МОХНАТКИН, П. Н. СОЛОНЩИКОВ, А. С. ФИЛИНКОВ*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ СМЕСЕЙ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЖИДКИХ КОРМОВЫХ СМЕСЕЙ**

***Ключевые слова:** время приготовления, динамическая вязкость, качество смеси, смесь, стабильность, степень однородности, установка, частота вращения.*

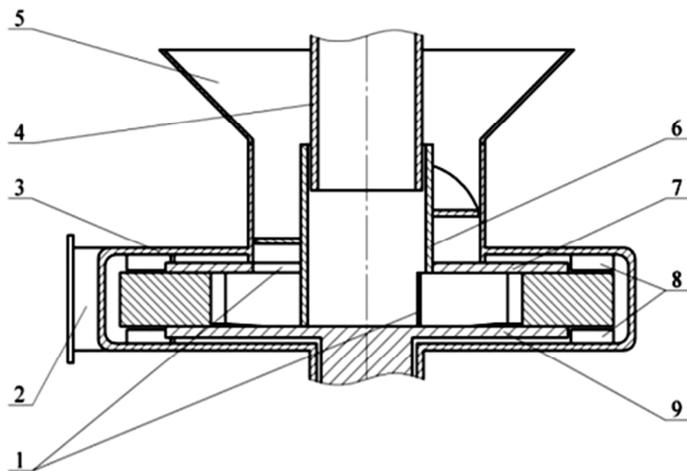
***Аннотация.** В данной статье представлены результаты опытов по определению качества смешивания в установке для приготовления жидких кормовых смесей. На основании проведенных исследований получены математические модели, влияющие на процесс смешивания.*

Процессы смешивания и растворения растворимых порошкообразных материалов и кристаллических веществ в жидкости широко используются в народном хозяйстве, в том числе в пищевой промышленности и при получении кормовых смесей для кормления животных.

Анализ конструкций устройств для смешивания и растворения позволили выявить следующие основные эксплуатационные и технологические требования: дозирование жидких и сыпучих компонентов, исключение намокания и налипания сыпучих компонентов из-за их отдельного подвода с жидкостью, интенсивное смешивание, совмещение функций смесителя и перекачивающего насоса в одном устройстве, малые габариты [1, с. 22].

Таким устройством является установка состоящая из рабочей камеры 3 (рисунок 1), соединенной с загрузочной камерой 5, внутри которой расположено рабочее колесо. Рабочее колесо выполнено как комбинация открытого колеса на периферии и закрытого колеса в центре, снизу ограниченного основным 9, а сверху – покрывным диском 7. Покрывной диск 7 соединен с расположенной по центру втулкой 6, имеющей спиральную навивку. В покрывном диске и втулке выполнены окна 1, расположенные так, что между каждыми двумя лопатками рабочего колеса последовательно чередуются окна во втулке и покрывающем диске.

Жидкость поступает в центр рабочего колеса через питающий патрубок 4 и окна 1 во втулке, а порошкообразный компонент принудительно подается спиральной навивкой через горизонтальные окна в покрывающем диске 7. Компоненты предварительно смешиваются на открытой части колеса, затем при взаимодействии с неподвижными лопатками 8 и далее в кольцевом отводе происходит окончательное смешивание компонентов.



а



б

Рисунок 1 – Схема (а) и общий вид (б) установки для приготовления жидких кормовых смесей

Установка предназначена для работы в составе поточных технологических линий или как самостоятельная машина (в совокупности с резервуаром), работающая по циклическому процессу.

Первоначально находящиеся раздельно жидкость и порошкообразный компонент после равномерного распределения каждого из них в смешиваемом объеме материала образуют однородную смесь.

Для изучения процессов смешивания устройство собиралось с открытым контуром по проточной и циркуляционной схемам (рис.2).

Стенд работает следующим образом (рис. 2). По проточной схеме: перед началом работы краны 4 и 9 закрывают, а краны 3 и 5 открывают. После запуска электродвигателя открывают кран 9 и засыпают в загрузочную камеру порошкообразные компоненты. Полученная смесь поступает в бак 6.

При циркуляции кран 5 закрыт, а 3 и 9 открыты. При открытии крана 4 жидкость начинает двигаться по замкнутому контуру, затем дозированно засыпают сухие компоненты в загрузочную камеру. По прошествии некоторого времени готовую смесь перекачивают в бак 6, закрыв кран 4 и открыв кран 5.

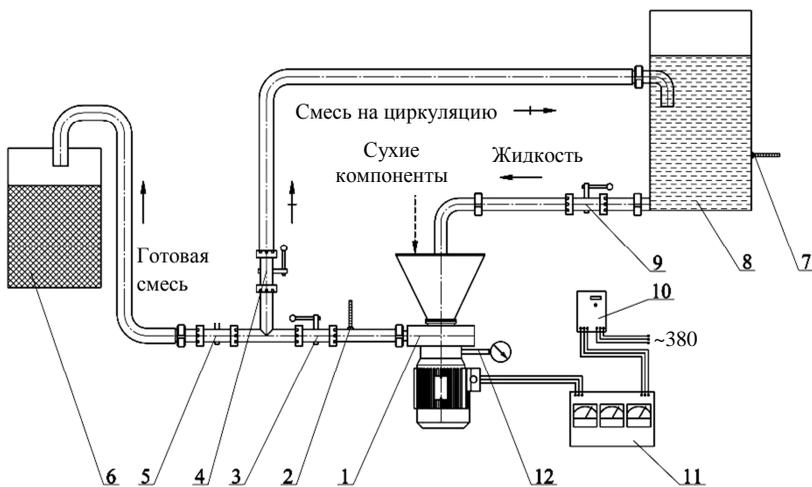


Рисунок 2 – Схема работы установки с открытым контуром:  
 1 – установка; 2, 7 – термометры; 3, 4, 5, 9 – шаровые краны; 6 – бак с готовой смесью; 8 – бак с жидкостью; 11 – мультиметр DMK-20;  
 10 – частотный преобразователь; 12 – тахометр.

Был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния технологических параметров установки на качество получаемых смесей. Изучали смешивание компонентов по двум режимам: 1-й – при непрерывном внесении компонентов, 2-й – при порционном внесении сыпучих компонентов в жидкость [2, с. 16; 3, с. 51].

На первом этапе производили оценку стабильности полученной смеси. За критерии оптимизации были приняты стабильность к коалесценции  $T_k$  и полная стабильность  $T_c$ .

При непрерывном внесении компонентов факторами выступали частота вращения рабочего колеса  $n(x_1)$  и динамическая вязкость жидкости  $\mu(x_2)$ , которая изменялась в зависимости от температуры.

После реализации опытов, расчета коэффициентов регрессии получены следующие математические модели рабочего процесса:

$$T_k = 142,7 - 6,10 \cdot x_1 + 10,62 \cdot x_2 - 18,28 \cdot x_1^2 - 12,015 \cdot x_1 \cdot x_2 - 10,05 \cdot x_2^2. \quad (1)$$

$$T_c = 21,57 + 6,39 \cdot x_1 + 15,87 \cdot x_2 + 1,44 \cdot x_1^2 - 14,57 \cdot x_1 \cdot x_2 + 31,7 \cdot x_2^2. \quad (2)$$

При порционном внесении сыпучих компонентов в жидкость в качестве факторов были выбраны время приготовления  $t(x_1)$  и частота вращения рабочего колеса  $n(x_2)$ .

После реализации опытов, расчета коэффициентов регрессии получены следующие математические модели рабочего процесса:

$$T_k = 70,06 + 5,47 \cdot x_1 + 7,64 \cdot x_2 + 13,87 \cdot x_1^2 + 19,44 \cdot x_2^2. \quad (3)$$

$$T_c = 46,11 + 0,47 \cdot x_1 + 3,88 \cdot x_2 - 14,17 \cdot x_1^2 - 13,73 \cdot x_1 \cdot x_2 + 7,46 \cdot x_2^2. \quad (4)$$

По моделям (1...4) построены двумерные сечения (рис. 3,4).

Анализируя двумерное сечение (рисунок 3, а), можно сделать вывод, что при динамической вязкости жидкости  $\mu = 1,002$  (Н·с/м<sup>2</sup>)·10<sup>-3</sup> и частоте вращения рабочего колеса  $n = 1050$  мин<sup>-1</sup> достигли значения стабильности к коалесценции  $T_k = 145$  ч. По двумерному сечению (рисунок 3, б) наибольшее значение полной стабильности достигается при динамической вязкости жидкости  $\mu = 0,981...1,002$  (Н·с/м<sup>2</sup>)·10<sup>-3</sup> и частоте вращения рабочего колеса  $n = 750...1750$  мин<sup>-1</sup>, при этом значение стабильности  $T_c = 56$  с.

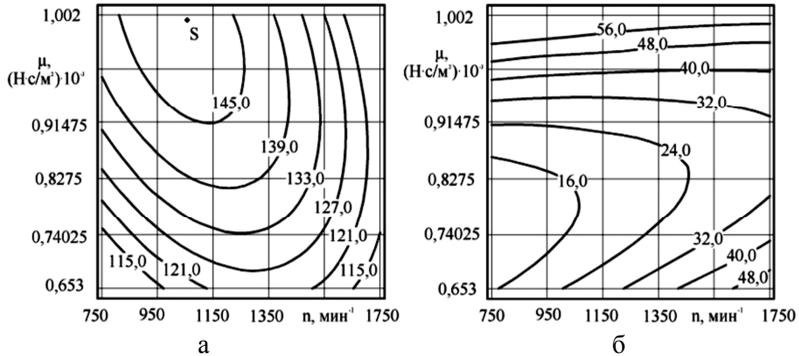


Рисунок 3 – Двумерные сечения поверхностей отклика для стабильности к коалесценции  $T_{к,ч}$  (а) и полной стабильности  $T_c$ , с (б) по 1-му режиму

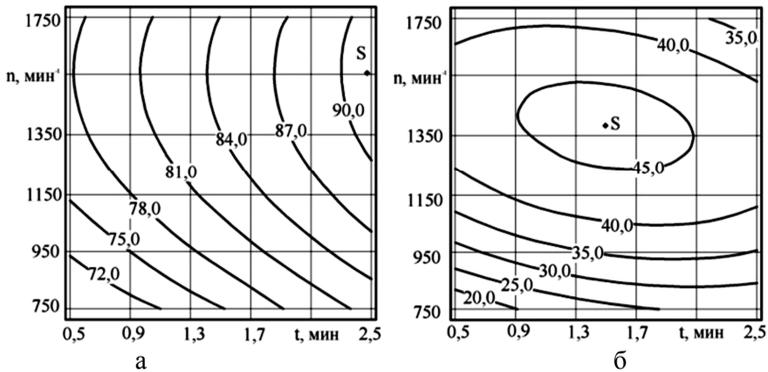


Рисунок 4 – Двумерные сечения поверхностей отклика для стабильности к коалесценции  $T_{к,ч}$  (а) и полной стабильности  $T_c$ , с (б) по 2-му режиму

Анализируя двумерное сечение (рисунок 4, а), можно сделать вывод, что при времени приготовления  $t = 2,2...2,51$  мин и частоте вращения рабочего колеса  $n = 1250...1750$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение стабильности к коалесценции составляет  $T_k = 90$  ч. Полная стабильность (рисунок 4, б) имеет наибольшее значение  $T_c = 45$  с при времени приготовления  $t = 0,9...2,1$  мин и частоте вращения рабочего колеса в пределах  $n = 1250...1450$  мин<sup>-1</sup>.

Для определения эффективности работы установки как растворителя молочных продуктов использовали экспресс-метод – показатель полноты растворения (ППР).

$$ППР = \frac{M_{осадок} - M_{ёмкость}}{M_{смеси}} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где  $M_{осадок}$  – масса ёмкости с осадком, кг;  $M_{ёмкость}$  – масса ёмкости до проведения испытаний, кг;  $M_{смеси}$  – масса смеси, прошедшая за время смешивания, кг.

$$M_{смеси} = \frac{Q \cdot t}{3600} \cdot 10^3, \quad (6)$$

где  $Q$  – подача устройства, т/ч;  $t$  – время прохождения смеси через установку, с.

Исследования проводили по 1-му режиму при тех же факторах, что и при определении стабильности смеси.

После реализации опытов, расчета коэффициентов регрессии получена математическая модель рабочего процесса (ППР) по 1-му режиму:

$$ППР = 2,1 - 1,41 \cdot x_1 - 0,48 \cdot x_2 + 1,82 \cdot x_1^2 + 0,49 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,27 \cdot x_2^2. \quad (7)$$

Математическая модель (7) показывает, что наибольшее влияние на показатель полноты растворения оказывает частота вращения рабочего колеса ( $b_1 = -1,41$ ).

При порционном внесении сыпучих компонентов в жидкость в качестве факторов были выбраны время приготовления  $n$  ( $x_1$ ) и частота вращения рабочего колеса  $t$  ( $x_2$ ) согласно проведенным однофакторным экспериментам.

После реализации опытов, расчета коэффициентов регрессии получены следующие математические модели рабочего процесса по 2-му режиму:

$$ППР = 2,81 - 0,51 \cdot x_1 - 1,05 \cdot x_2 + 0,59 \cdot x_1^2 + 0,52 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,80 \cdot x_2^2. \quad (8)$$

Математическая модель (8) показывает, что наибольшее влияние на показатель полноты растворения оказывает время приготовления ( $b_2 = -1,05$ ).

Анализ математических моделей (7, 8) проводили с помощью двумерных сечений поверхности отклика (рисунок 5).

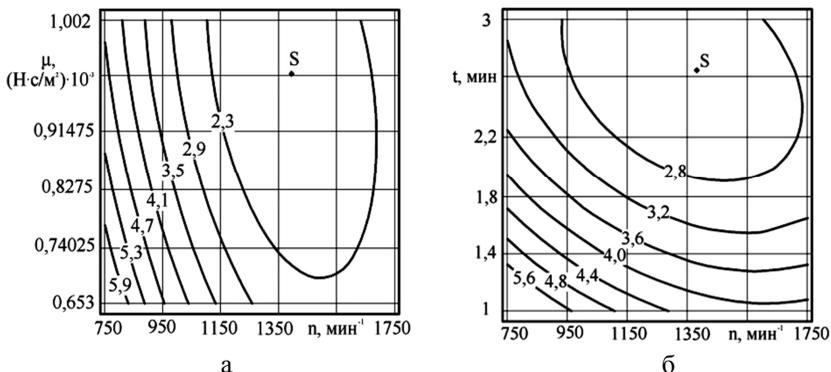


Рисунок 5 – Двумерные сечения поверхностей отклика для показателя полноты растворения (ППР) по 1-му режиму (а) и по 2-му режиму (б)

Двумерное сечение поверхности отклика (рисунок 5, а) показывает, что при динамической вязкости жидкости,  $\mu = 0,95837 \dots 1,002 \text{ (H}\cdot\text{c}/\text{M}^2) \cdot 10^{-3}$  и частоте вращения рабочего колеса  $n$  от 1400 до  $1650 \text{ мин}^{-1}$  достигли значения ППР = 2,3 %.

При анализе двумерного сечения поверхности отклика (рисунок 5, б) пришли к выводу, что при времени приготовления  $t = 2,5 \text{ мин}$  и частоте вращения  $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$  достигли значения ППР = 2,8 %.

Исследования степени однородности  $\Theta$  проводили так же в зависимости от принятых ранее факторов. Для оценки отклонения степени однородности использовали коэффициент вариации  $v$ .

Степень однородности, определяли по формуле:

$$\Theta = \frac{\Phi_o(z_i)}{\Phi(z-3)} = \frac{\Phi_o(z_i)}{0,9973}, \quad (9)$$

где  $\Phi_o$  – нормированная функция Лапласа.

В качестве критерия оценки степени однородности использовали коэффициент неоднородности (вариации), выражаемый в %

$$v_c = 100 \cdot \frac{S}{\bar{x}}, \quad (10)$$

где  $S$  – величина среднего квадратического отклонения контрольного компонента по данным опытов;  $\bar{x}$  – среднее значение контрольного компонента.

После реализации опытов, расчета коэффициентов регрессии получены следующие математические модели рабочего процесса по 1-му режиму:

$$\Theta = 72,89 - 7,6 \cdot x_1 + 1,3 \cdot x_2 + 4,52 \cdot x_1^2 + 15,24 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,06 \cdot x_2^2, \quad (11)$$

$$\nu = 8,58 - 6,92 \cdot x_1 + 0,88 \cdot x_2 + 5,07 \cdot x_1^2 + 6,88 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,68 \cdot x_2^2. \quad (12)$$

Математические модели (11) и (12) показывают, что наибольшее влияние оказывает частота вращения рабочего колеса ( $b_1 = -7,6$ ,  $b_1 = -6,92$ ).

После реализации опытов по 2-му режиму, после расчета коэффициентов регрессии получены следующие математические модели рабочего процесса:

$$\Theta = 74,43 - 2,6 \cdot x_1 + 1,21 \cdot x_2 + 1,22 \cdot x_1 \cdot x_2 - 3,42 \cdot x_2^2, \quad (13)$$

$$\nu = 10,56 + 2,6 \cdot x_1 - 1,21 \cdot x_2 - 1,22 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,42 \cdot x_2^2. \quad (14)$$

Математические модели (13) и (14) показывают, что наибольшее влияние на степень однородности и на коэффициент вариации оказывает частота вращения рабочего колеса ( $b_1 = -2,6$ ).

По математическим моделям (11...14) построены двумерные сечения поверхностей отклика, представленные на рисунке 6.

Анализируя сечение (рисунок 5, а), приходим к выводу что показатель полноты растворения имеет наиболее выраженный оптимум ( $ППР = 2,3 \%$ ), где частота вращения рабочего колеса  $n$  находится в пределах от 1400 до 1650  $\text{мин}^{-1}$  при значении динамической вязкости жидкости  $\mu = 0,958375 \dots 1,002 \text{ (Н} \cdot \text{с/м}^2) \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, используя условный метод наложения двумерных сечений, получим, что при частоте вращения рабочего колеса  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и динамической вязкости  $\mu = 1,002 \text{ (Н} \cdot \text{с/м}^2) \cdot 10^{-3}$  показатели качества смешивания будут следующие: стабильность к коалесценции  $T_{\kappa} = 133 \text{ с}$ , полная стабильность  $T_c = 56 \text{ с}$ , показатель полноты растворения  $ППР = 2,3 \%$ , степень однородности  $\Theta = 76 \%$  и коэффициент вариации  $\nu = 12 \%$  (для 1-го режима).

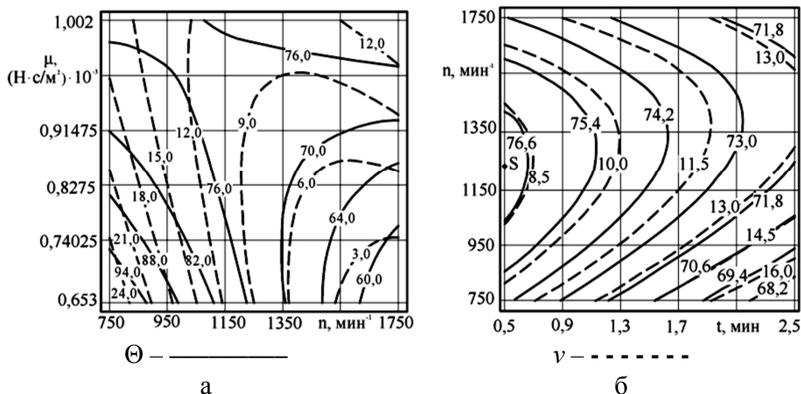


Рисунок 6 – Двумерные сечения поверхностей отклика для степени однородности  $\Theta$ , % по 1-му режиму и по 2-му режиму

При порционном смешивании компонентов (2-й режим) при времени приготовления  $t = 2$  мин и частоте вращения рабочего колеса  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> показатели качества смешивания будут следующие: стабильность к коалесценции  $T_k = 87$  ч, полная стабильность  $T_c = 45$  с, показатель полноты растворения  $ППР = 2,8$  %, степень однородности  $\Theta = 73\%$ , коэффициент вариации  $\nu = 11,5$  %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мохнаткин В. Г., Филинков А. С., Солонщиков П. Н. Устройство ввода и смешивания сыпучих компонентов с жидкостью // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2012. № 9. С. 22–24.
2. Мохнаткин В. Г. Филинков А. С., Солонщиков П. Н. Исследование процессов смешивания сыпучих компонентов с жидкостью при их порционном внесении // Пермский аграрный вестник. 2013. № 2. С. 15–20.
3. Солонщиков П. Н. Исследование устройства для приготовления смесей // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2013. № 9. С. 50–53.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF QUALITY OF RESULTING MIXTURES IN COOKING EQUIPMENT FOR LIQUID FEED MIXTURES

**Keywords:** *blend , installation , dynamic viscosity, speed , cooking time , mix quality , degree of homogeneity , stability.*

**Annotation.** *This article presents the results of experiments to determine the quality of mixing in a plant for making liquid feed mixtures . Based on the studies prepared mathematical models affecting the mixing process.*

---

**МОХНАТКИН ВИКТОР ГЕРМАНОВИЧ** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВПО Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, г. Киров, ([mohnatkin@vgsha.info](mailto:mohnatkin@vgsha.info)).

**МОКННАТКИН ВИКТОР ГЕРМАНОВИЧ** – doctor of technical sciences , professor, head of the chair of technological and energy equipment , Vyatka State Agricultural Academy, Russia , Kirov , ([mohnatkin@vgsha.info](mailto:mohnatkin@vgsha.info)).

**СОЛОНЩИКОВ ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ** – ассистент кафедры технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВПО Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, г. Киров, ([solon-pavel@yandex.ru](mailto:solon-pavel@yandex.ru)).

**SOLONSCHIKOV PAVEL NIKOLAEVICH** – assistant of the chair of technological and energy equipment , Vyatka State Agricultural Academy, Russia , Kirov , ([solon-pavel@yandex.ru](mailto:solon-pavel@yandex.ru)).

**ФИЛИНКОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологического и энергетического оборудования, ФГБОУ ВПО Вятская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, г. Киров, ([filin-a@yandex.ru](mailto:filin-a@yandex.ru)).

**FILINKOV ANDREW SERGEEVICH** – candidate of technical sciences, docent of the chair of technology and energy equipment, Vyatka State Agricultural Academy, Russia, Kirov, ([filin-a@yandex.ru](mailto:filin-a@yandex.ru)).

---