

**Результаты экспериментов  
и их обсуждение**

Данные показывают, что эффективность процесса разуплотнения почвы промораживанием зависит от ее влажности и плотности на момент промораживания. Эта зависимость является нелинейной и имеет точку максимума, соответствующую оптимальной влажности, при которой почва определенной плотности максимально эффективно разуплотняется. Например, для почвы плотностью 1,1 и 1,2 г/см<sup>3</sup> оптимальным интервалом влажности для разуплотнения промораживанием является 29-31%, для более плотной почвы с исходной плотностью 1,3 и 1,4 г/см<sup>3</sup> – 28,5-30,5 и 28-30% соответственно.

Таким образом, для обеспечения эффективного процесса разуплотнения уплотненной почвы промораживанием необходимо оптимальное количество влаги – не менее 28%.

**Вывод**

Анализ экспериментальных данных позволяет прогнозировать эффективность процесса саморазуплотнения почвы промораживанием в естественных условиях, а также наметить и разработать необходимые мероприятия при осенней обработке почвы.

**Библиографический список**

1. Ревут И.Б. Физика в земледелии / И.Б. Ревут. М.: Физматгиз, 1960.
2. Скворцова Е.Б. Трансформация порового пространства уплотненных почв в ходе сезонного промерзания и оттаивания / Е.Б. Скворцова, П.М. Сапожников // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1371-1381.
3. Почвоведение / под ред. И.С. Кауричева. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1982. 496 с.



УДК 633.34:664.0:636.084

Г.М. Харченко

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
БИКОНИЧЕСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЦЕНТРИФУГИ ВФКЦ-2  
НА КИСЛОТНОЕ ЧИСЛО ОЧИЩЕННОГО ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА**

Теоретическим основам производства и очистки растительных масел, вопросам совершенствования конструкций аппаратов, оптимизации параметров и их рабочих органов посвящены работы следующих авторов: В.А. Арутюнян, В.В. Белобородова, И.В. Гавриленко, Г.И. Гарбузовой, А.И. Голдовского, В.П. Доценко, С.М. Доценко, Б.Н. Тютюнникова, В.Г. Щербакова, М.И. Журавлева, В.Х. Паронян, В.М. Копейковского, И.М. Товбина, Г.Г. Фаниева, В.А. Жужжикова, В.И. Соколова и др.

В работах В.А. Жужжикова, В.И. Соколова большое внимание уделяется теоретическим основам очистки растительных масел, в частности, центрифугированию и анализу конструкций центрифуг [1, 2]. Технологический процесс очистки растительных масел в биконической центрифуге описан в монографии [3].

В биконической фильтрующей центрифуге ВФКЦ-2 процесс очистки растительных масел будет происходить путем осаждения в центробежном и гравитационном полях с одновременной фильтрацией при прохождении через слой фильтрующего материала – цеолита.

Качество очистки в центрифуге ВФКЦ-2 зависит от производительности, которая регулируется за счет изменения площади выходных отверстий из рабочего пространства ротора [4, 5]. Течение масла через отверстие небольшой длины, равной 0,5 от диаметра отверстия, можно рассматривать как течение при полном сжатии струи. При толщине крышки, равной 3 мм, и диаметре отверстия 1,5 мм, принятых в центрифуге, это условие обеспечивается за счет притупления кромки. В этом случае можно принять

$$W = F_{отв} \cdot \mu_1 \rho_f (2\Delta\rho/\rho_f)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $F_{отв}$  – площадь отверстия на выходе из центрифуги,  $м^2$ ;

$\mu_f$  – коэффициент расхода;

$\Delta p$  – давление жидкости, Па;

$\rho_f$  – плотность очищенного масла,  $кг/м^3$ .

Давление жидкости в биконической центрифуге с четом [5]:

$$\Delta p = \rho_f \omega^2 (R^2 - r_0^2) / 2, \quad (2)$$

где  $\omega$  – частота вращения ротора центрифуги,  $с^{-1}$ ;

$R$  – средний радиус наружной обечайки ротора центрифуги, м;

$r_0$  – средний радиус внутренней обечайки, м.

Средние радиусы определяются по уравнениям:

$$R = (R_{max} R_{min})^S; \quad (3)$$

$$r_0 = (r_{max} r_{min})^S; \quad (4)$$

где  $R_{max}$ ,  $R_{min}$  – максимальный и минимальный радиусы наружной обечайки ротора центрифуги, м;

$r_{max}$ ,  $r_{min}$  – максимальный и минимальный радиусы внутренней обечайки ротора, м;

тогда

$$\Delta p = \rho_f \omega^2 [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})] / 2 \quad (5)$$

и производительность

$$W = F_{отв} \mu_f \rho_f (2\Delta p / \rho_f)^S = F_{отв} \rho_f \mu_f \omega [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})]^S.$$

Окончательно получим

$$W = F_{отв} \rho_f \mu_f \omega [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})]^S. \quad (6)$$

Согласно [6]

$$W = 0,0215 \omega C_m C_u k_{ц1}, \quad (7)$$

где  $C_m$  – показатель, характеризующий влияние свойств обрабатываемого масла на производительность конической центрифуги,  $кг \cdot с / м^5$ ;

$C_u$  – показатель, характеризующий влияние параметров фильтровальной перегородки (цеолита) на производительность конической центрифуги,  $м^2$ ;

$k_{ц1}$  – показатель, характеризующий влияние конструктивных параметров,  $м^3$ .

$$C_u = d^2 \varepsilon \xi^3 / (1 + \xi). \quad (8)$$

где  $d$  – диаметр частиц цеолита, м;

$\varepsilon$  – коэффициент порозности фильтрующего материала, экспериментально получено  $\varepsilon = 8 d + 0,4$ ;

$\xi$  – коэффициент пористости фильтрующего материала, экспериментально получено  $\xi = 26,75 d + 0,67$ .

$$k_{ц1} = r_{min} / tg\theta_0 \{ [(r_{min} + H tg\theta_0) r_{min}]^S + [(r_{min} + H tg\theta_0 + \ell_2)(r_{min} + \ell_2)]^S \}^2, \quad (9)$$

где  $H$  – высота конуса ротора, м;

$\theta_0$  – угол между осевой линией и образующей ротора центрифуги, град.;

$\ell_2$  – радиальное расстояние между обечайками ротора центрифуги, м.

Приравняв уравнения (6) и (7), получим

$$W = F_{отв} \rho_f \mu_f \omega [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})]^S = 0,0215 \omega C_m C_u k_{ц1}. \quad (10)$$

Из уравнения (8) следует, что

$$C_m = F_{отв} \rho_f \mu_f [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})]^S / [0,0215 \omega C_u k_{ц1}]. \quad (11)$$

Уравнение (11) является основным уравнением фильтрования в биконических фильтрующих центрифугах.

Оно показывает влияние кинематических, конструктивных параметров и параметров фильтровальной перегородки на качественные показатели функционирования вертикальных фильтрующих конических центрифуг.

С целью выявления влияния конструктивно-кинематических параметров центрифуги ВФКЦ-2 на кислотное число очищенного масла проведен натурный эксперимент. Эксперимент проведен на центрифуге со следующими конструктивными параметрами:

$$R_{max} = R_{min} + H tg\theta_0 \text{ и } r_{max} = r_{min} + H tg\theta_0$$

$$\text{при } R_{min} = 0,048 \text{ м, } r_{min} = 0,04 \text{ м;}$$

$$H = 0,135 \text{ м, } tg\theta_0 = tg35^\circ = 0,7, H tg\theta_0 =$$

$$= 0,0945 \text{ м, } [(R_{max} R_{min}) - (r_{max} r_{min})]^S =$$

$$= 0,0382 \text{ м, а } v = 0,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с, } d_0 =$$

$$= 0,0015 \text{ м, } \ell_2 = 0,028 \text{ м, } \varepsilon = 8 d + 0,4,$$

$$\xi = 26,75 d + 0,67, k_{ц1} = 0,00181 \text{ м}^3.$$

В качестве критерия оптимизации при проведении натурального эксперимента принято кислотное число очищенного подсолнечного масла  $Y(K)$ .

Обозначения и уровни варьирования принятых в исследовании факторов представлены в таблице, эксперимент выполнен по симметричному некомпозиционному плану Бокса-Бенкина.

После проведенного эксперимента выявлялись наиболее значимые факторы и их влияние на процесс очистки.

Для критерия оптимизации получены уравнения регрессии в кодированном (12) и раскодированном (13) виде:

$$Y = 1,77 + 0,23X_1 + 0,084X_2 - 0,000015X_1X_2 + 0,000007X_1X_3 - 0,000045X_2X_3 - 0,0023X_1^2 - 0,00079X_2^2 + 0,0063X_3^2. \quad (12)$$

Оценка тесноты связи в раскодированной форме между частотой вращения ротора центрифуги, площадью отверстий на выходе очищенного масла из центрифуги, эквивалентным диаметром частиц цеолита и кислотным числом очищенного подсолнечного масла оценивается коэффициентами детерминации  $R^2 = 0,788$  и корреля-

ции  $R = 0,888$  при доверительной вероятности  $p < 0,05$ .

Адекватность уравнения регрессии (12) оценивается расчетным критерием Фишера  $F = 6,19$ , который больше табличного  $F_{\text{табл}} = 4,8$ , следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает экспериментальные данные.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии (12) по критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты уравнения, кроме  $b_3$ , значимы при доверительной вероятности  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $df = 5$ , так как рассчитанные критерии Стьюдента ( $t$ -статистика) меньше критического  $t_{\text{кр}} = 2,57$ .

Уравнение регрессии в раскодированном виде:

$$K = 2,78 + 0,00135\omega - 0,877F_{\text{отв}} - 599,657d + 0,000919\omega F_{\text{отв}} - 0,225\omega d - 72,284F_{\text{отв}}d - 0,00001\omega^2 + 0,0219F^2 + 92812,5d^2. \quad (13)$$

Оценка тесноты связи уравнения регрессии в раскодированной форме между факторами и кислотным числом очищенного подсолнечного масла оценивается коэффициентами детерминации  $R^2 = 0,912$  и корреляции  $R = 0,955$  при доверительной вероятности  $p < 0,05$ .

Математическая модель (13) адекватна экспериментальным данным, так как оценивается расчетным критерием Фишера  $F = 14,82$ , который больше табличного  $F_{\text{табл}} = 6,6$ .

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии (13) по критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты значимы при доверительной вероятности  $\alpha = 0,01$  и числе степеней свободы  $df = 5$ , так как рассчитанные критерии Стьюдента ( $t$ -статистика) меньше критического  $t_{\text{кр}} = 4,03$ .

Поскольку полученные уравнения все трехфакторные, от исходных уравнений регрессии переходили к уравнениям с двумя факторами, оставляя один из факторов на постоянном уровне.

Для определения кислотного числа очищенного подсолнечного масла  $Y(K)$  рассмотрены уравнения второго порядка в раскодированном виде:

а) совместное влияние частоты вращения ротора центрифуги  $X_1(\omega, \text{с}^{-1})$  и площади отверстий на выходе подсолнечного масла из центрифуги  $X_2(F_{\text{отв}}, \text{м}^2)$  при фиксированном значении эквивалентного диаметра частиц цеолита  $X_3(d = 0,004 \text{ м})$ :

$$K = 1,92 + 0,0013\omega - 0,14F_{\text{отв}} - 1,25 \cdot 10^{-5}\omega^2 + 0,0009F_{\text{отв}}\omega + 0,013F_{\text{отв}}^2; \quad (14)$$

б) совместное влияние частоты вращения ротора центрифуги  $X_1(\omega, \text{с}^{-1})$  и эквивалентного диаметра частиц цеолита  $X_3(d, \text{м})$  при фиксированной площади отверстий на выходе очищенного масла из центрифуги  $X_2(F_{\text{отв}} = 3,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2)$ :

$$K = 3,38 - 0,048\omega - 844,42d - 1,015 \cdot 10^{-5}\omega^2 - 0,225\omega d + 91490,38d^2; \quad (15)$$

в) совместное влияние площади отверстий на выходе очищенного масла из центрифуги  $X_2(F_{\text{отв}}, \text{м}^2)$  и эквивалентного диаметра частиц цеолита  $X_3(d, \text{м})$  при фиксированной частоте вращения ротора центрифуги  $X_1(\omega = 150 \text{ с}^{-1})$ :

$$K = 2,77 + 0,21F_{\text{отв}} - 648,22d + 0,024F_{\text{отв}}^2 - 72,28F_{\text{отв}}d + 94663,46d^2. \quad (16)$$

После получения адекватных математических моделей, определяющих технологические параметры работы фильтрующей центрифуги в зависимости от величины фактора, проводился их анализ.

Сечения поверхностей откликов (рис. 1-3), построенные по уравнениям регрессии (14-16), показывают зависимости кислотного числа очищенного подсолнечного масла от факторов: частоты вращения ротора центрифуги  $X_1(\omega)$ , площади отверстий на выходе очищенного масла из центрифуги  $X_2(F_{\text{отв}})$  и эквивалентного диаметра частиц цеолита  $X_3(d)$  при соответствующих фиксированных значениях факторов.

Таблица

Уровни варьирования факторов

Факторы и их обозначения	Уровни варьирования		
	-1	0	+1
Частота вращения ротора центрифуги $X_1(\omega), \text{с}^{-1}$	50	150	250
Площадь отверстий на выходе масла из центрифуги $X_2(F_{\text{отв}}), \text{м}^2$	$1,77 \cdot 10^{-6}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$
Эквивалентный диаметр частиц цеолита $X_3(d), \text{м}$	0,002	0,004	0,006

Из анализа рисунка 1 следует, что при фиксированном значении эквивалентного диаметра частиц цеолита  $d = 0,004$  м уменьшение площади отверстий на выходе из центрифуги  $F_{отв}$  с  $1,77 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> и увеличением частоты вращения ротора центрифуги  $\omega$  с 50 до 350 с<sup>-1</sup> кислотное число очищенного подсолнечного масла уменьшается до нуля.

При фиксированном значении площади отверстий на выходе из центрифуги (рис. 2)  $F_{отв} = 3,53 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> при уменьшении эквивалентного диаметра частиц цеолита  $d$  с 0,002 до 0,001 м и частоте вращения ротора центрифуги  $\omega$  100-350 с<sup>-1</sup> кислотное число очищенного подсолнечного масла уменьшается с 1,0 до 0,5 мг КОН/г.

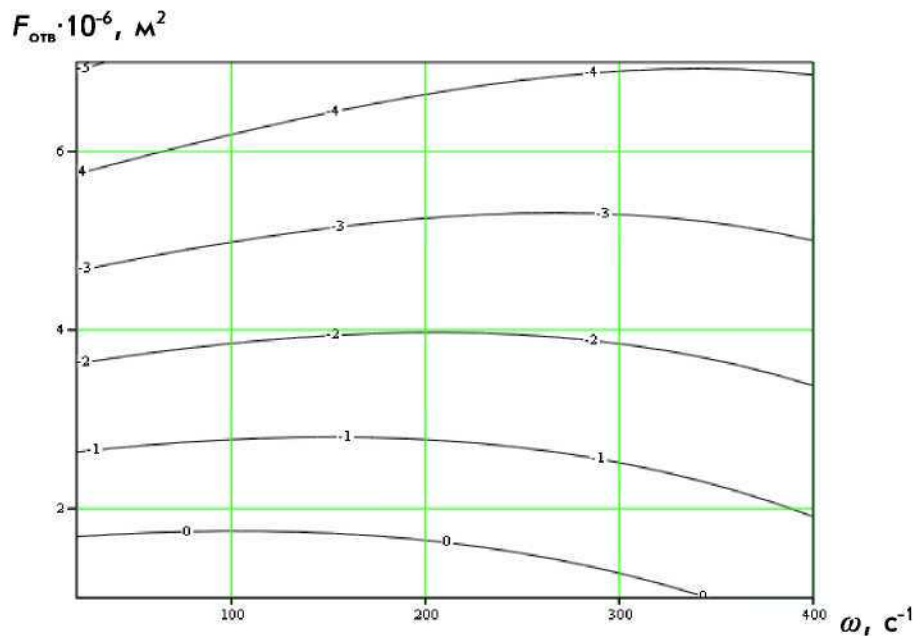


Рис. 1. Сечения отклика  $Y(K)$  на плоскость  $\omega F_{отв}$  при  $d = 0,004$  м

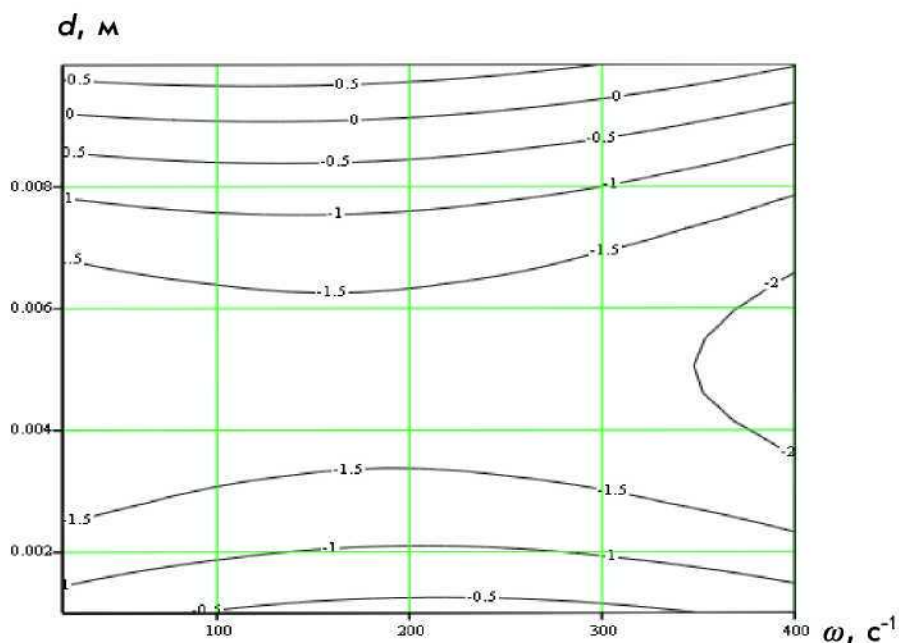


Рис. 2. Сечения отклика  $Y(K)$  на плоскость  $\omega d$  при  $F_{отв} = 3,53 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>

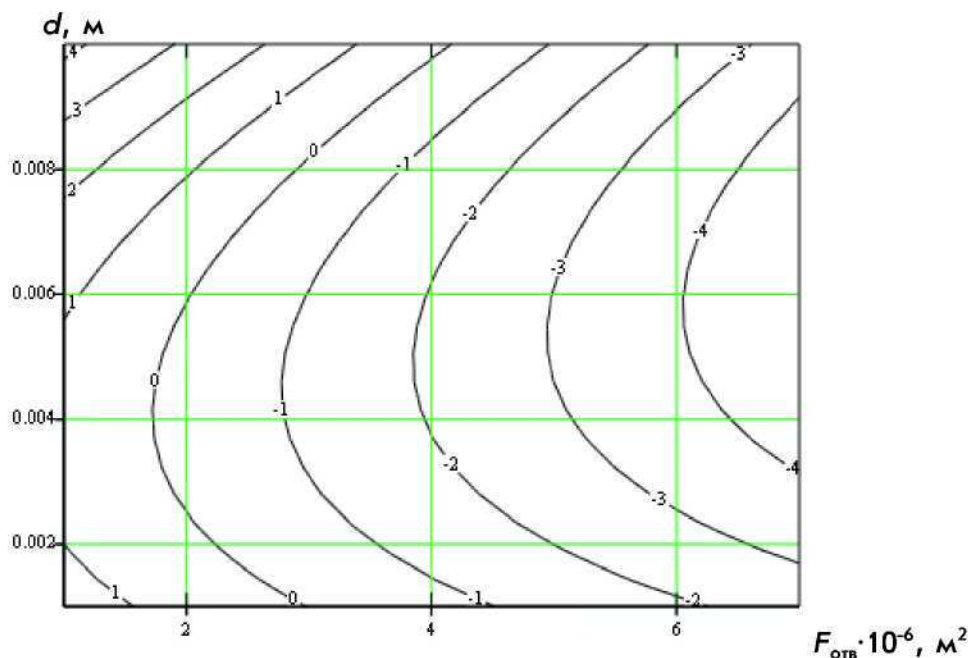


Рис. 3. Сечения отклика  $Y(K)$  на плоскость  $F_{отв}d$  при  $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$

При фиксированном значении частоты вращения ротора центрифуги (рис. 3)  $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$  с увеличением площади отверстий на выходе из центрифуги  $F_{отв}$  с  $1,0 \cdot 10^{-6}$  до  $1,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  и уменьшением эквивалентного диаметра частиц цеолита  $d$  с 0,007 до 0,001 м происходит уменьшение кислотного числа очищенного подсолнечного масла с 1,0 мг КОН/г до нуля. При эквивалентном диаметре частиц цеолита  $d = 0,004 \text{ м}$  и площади отверстий на выходе из центрифуги  $F_{отв} = 1,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  наблюдается минимальное значение кислотного числа очищенного подсолнечного масла, близкое к нулю.

#### Выводы

Качество очистки подсолнечного масла на вертикальной фильтрующей конической центрифуге ВФКЦ-2 с объемом рабочего пространства  $k_{ц1} = 0,00181 \text{ м}^3$  по кислотному числу в пределах  $1 > K > 0$  достигается при следующих значениях факторов: эквивалентный диаметр частиц цеолита  $d = 0,002-0,004 \text{ м}$ , площадь отверстий на выходе из центрифуги  $F_{отв} = 1,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  и частота вращения ротора центрифуги  $\omega = 200-300 \text{ с}^{-1}$ .

#### Библиографический список

1. Жужжиков В.А. Фильтрация, теория и практика разделения суспензий /

В.А. Жужжиков. М.: Госхимиздат, 1980. 397 с.

2. Соколов В.И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств / В.И. Соколов. М.: Машиностроение, 1983. 447 с.

3. Центрифуга для очистки жидкости / С.М. Доценко, Г.М. Харченко, Ю.Б. Курков // Пат. 2108169 РФ: МПК В 04 В 3/00, В 04 В 11/00; № 96110552/13; заявл. 27.05.96; опубл. 10.04.98, Бюл. № 10. 3 с.

4. Центрифуга для очистки жидкости / В.И. Земсков, Г.М. Харченко // Пат. 2313401 РФ: МПК В 04 В 3/00, В 04 В 11/00. № 2006120778/12; заявл. 13.06.2006; опубл. 27.12.07, Бюл. № 36. 5 с.

5. Земсков В.И. Структурно-технологические основы моделирования процесса получения и рафинации растительных масел: монография / В.И. Земсков, Г.М. Харченко. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. 151 с.

6. Харченко Г.М. Механико-технологические основы фильтрации растительных масел в конических центрифугах (основы теории и расчета): монография / Г.М. Харченко. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. 158 с.

