

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ

УДК 664.8.067.16

З. В. ЛОВКИС, М. П. ШАБЕТА

ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОТЕКУЧИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ В ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию, Минск, Беларусь,
e-mail: info@belproduct.com*

(Поступила в редакцию 30.03.2015)

Разделение технологических суспензий на промышленных предприятиях часто связано со значительными экономическими затратами.

Процесс разделения суспензий с использованием пористых перегородок, которые задерживают твердую фазу суспензии и пропускают ее жидкую часть, называют фильтрованием. Фильтрование зачастую дает такой качественный эффект разделения, какой трудно достигнуть другим способом.

Эффективность процесса фильтрования зависит от многих факторов, в первую очередь к которым следует отнести:

- концентрацию твердой фазы в жидкости;
- размер частиц твердой фазы;
- структуру осадка, образующегося на фильтровальной перегородке (кристаллический, аморфный);
- выбранный способ создания перепада давлений над и под фильтровальной перегородкой (при постоянной разности давлений, при постоянной скорости фильтрования, при переменных разностях давлений и скорости фильтрования);
- интервал рабочего перепада давлений;
- выбранный метод фильтрования (с образованием осадка, с закупориванием пор);
- динамическую вязкость жидкой фазы и др. [1].

Существующие закономерности фильтрования, как правило, основаны на классической теории перемещения жидкости в капиллярной системе фильтрующей перегородки и отфильтровываемого осадка, при этом и фильтрующая перегородка, и осадок рассматриваются практически как несжимаемые структуры, имеющие постоянный удельный объем и пористость по мере накопления осадка и его сжатия.

Проведенные исследования на примере обезвоживания картофельной мякоти методом фильтрования позволили установить степень соответствия режимов фильтрования через фильтры с эластичным органическим осадком основам фильтрования через кристаллические структуры осадков, на которых обоснованы существующие закономерности фильтрования, а также изучить фильтрационные характеристики твердой фазы суспензии.

В соответствии с теорией фильтрования по Плаксину [2], скорость фильтрования определяют из выражения

$$v = \frac{V}{\tau F}, \quad (1)$$

где V – объем отфильтрованной жидкости, м³; τ – продолжительность фильтрования, с; F – площадь поверхности фильтрования, м².

Согласно уравнению Навье-Стокса, составляющие средней скорости движения жидкости в капиллярах фильтровальной перегородки в проекциях на оси x и y в декартовой системе координат составляют:

$$v_x = -\frac{\delta^2}{3\mu} \cdot \frac{dP}{dx}; \quad (2)$$

$$v_y = -\frac{\delta^2}{3\mu} \cdot \frac{dP}{dy}, \quad (3)$$

где δ – расстояние между стенками капилляра, м; P – давление фильтрации, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Коэффициент динамической вязкости (μ) оказывает влияние на параметры касательных напряжений, т.е. способность жидкости сопротивляться сдвигу одного слоя относительно другого. Коэффициенты динамической вязкости (μ) и кинематической вязкости (ν) связаны плотностью среды (ρ):

$$\mu = \nu \rho.$$

Коэффициент кинематической вязкости среды (суспензии) зависит в большей степени от температуры. Зависимость коэффициента кинематической вязкости ν некоторых жидкостей от температуры представлена в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента кинематической вязкости ν некоторых жидкостей от температуры, $\text{см}^2/\text{с}$

Жидкость	Температура, °C						
	0	10	20	30	40	50	60
Вода	0,0180	0,0130	0,0100	0,0080	0,0067	0,0056	0,0048
Молоко	–	0,0240	0,0170	–	–	–	–
Спирт	–	0,0190	0,0151	0,0130	0,0100	–	–
Масло растительное	18,0000	7,5000	3,0000	1,3000	0,6500	0,5000	0,2800

Скорость перемещения жидкости в единичном капилляре округлой формы (скорость фильтрования, м/с) определяется из уравнения Пуазейля:

$$v = \frac{d^2}{32\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L_n}, \quad (4)$$

где d – диаметр поры, м; L_n – средняя длина пор в пористом материале толщиной Δx , м.

Из уравнений (2)–(4) следует, что скорость фильтрования прямо пропорциональна давлению над фильтровальной перегородкой и квадрату расстояния между противоположными стенками в капилляре, обратно пропорциональна толщине перегородки и динамической вязкости фильтруемой жидкости.

Движущей силой процесса является перепад давлений $\Sigma(\Delta p)$ над и за фильтровальной перегородкой:

$$\Sigma(\Delta p) = \Delta p + \rho gh, \quad (5)$$

где Δp – статическое давление, создаваемое механизмом подачи жидкости на фильтрацию, (Па); ρgh – пьезометрическое давление жидкости на фильтровальную перегородку, Па; ρ – плотность фильтруемой жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение силы земного притяжения, $\text{м}/\text{с}^2$; h – высота столба жидкости над фильтровальной перегородкой, м.

Для реальных фильтров при значительной высоте столба жидкости h значение второго члена правой части уравнения (5) может быть существенным. При исследованиях, где величина h не превышает нескольких сантиметров, значение данного члена уравнения очень мало и в дальней-

шем нами не принимается в расчет, а в качестве Δp рассматривается только статическое давление механизма подачи суспензии над фильтровальной перегородкой.

Если принять, что на единице поверхности площади фильтрующего материала располагается n ($1/\text{м}^2$) пор, площадь поперечного сечения каждой из которых равна $\pi d^2/4$, то объемный расход жидкости Q ($\text{м}^3/\text{с}$) через фильтр площадью F (м^2) составит:

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4} n F. \quad (6)$$

Подставив из уравнения (4) в уравнение (6) значение v будем иметь:

$$Q = \frac{2,45 \cdot 10^{-2} \cdot F n}{L_n} \cdot \frac{d^4}{\mu} \cdot \Delta p. \quad (7)$$

В данном уравнении присутствуют величины d , n , L_n , которые на практике определить не представляется возможным.

Французский инженер-исследователь Дарси путем обобщения экспериментальных данных о гидравлическом сопротивлении пористых тел, в частности несжимаемых грунтов, получил зависимость для скорости фильтрования через пористые несжимаемые фильтры:

$$v = \frac{d^2}{\lambda \mu} \cdot \frac{\Delta p}{L}. \quad (8)$$

Здесь λ – коэффициент пропорциональности (в законе Дарси называется коэффициентом сопротивления фильтра, или коэффициентом сопротивления Дарси).

Для тонкостенных фильтровальных перегородок среднюю длину пор принято отождествлять с толщиной фильтровальной перегородки, следовательно:

$$L = \Delta x.$$

Используя уравнение Дарси (8), расход жидкости через фильтр, состоящий из чистой пористой перегородки, можно представить в следующем виде:

$$Q = Fv = \frac{F d^2}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\lambda_n \Delta x_n}, \quad (9)$$

где λ_n – коэффициент сопротивления фильтровальной перегородки; Δx_n – толщина фильтровальной перегородки, м.

Анализ уравнения (9) показывает, что при увеличении коэффициента сопротивления фильтра для обеспечения одной и той же производительности Q требуется увеличить давление над фильтровальной перегородкой.

Для процесса фильтрования жидкости через фильтровальную перегородку с несжимаемым осадком уравнение (9) примет следующий вид:

$$Q = Fv = \frac{F d^2}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\lambda_n \Delta x_n + \lambda_0 \Delta x_0}, \quad (10)$$

где λ_n – коэффициент сопротивления фильтрованию осадка; Δx_n – толщина слоя осадка на фильтре, м.

В последней формуле отражено, что осадок и фильтрующий материал образуют последовательно соединенные сопротивления движению жидкости, т.е.

$$(\lambda \Delta x) \sum = \lambda_n \Delta x_n + \lambda_0 \Delta x_0.$$

Зависимость расхода жидкости, проходящей через поверхность фильтрационного материала, от перепада давления при постоянной вязкости называется гидравлической характеристикой.

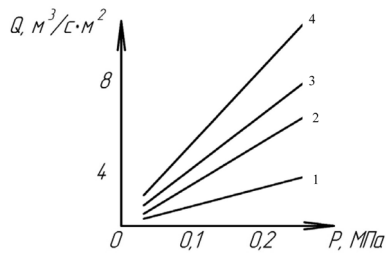


Рис. 1. Гидравлические характеристики фильтровальных материалов: 1 – картон; 2 – сетка; 3 – бумага; 4 – фетр

На рис. 1 приведены гидравлические характеристики некоторых фильтрационных материалов для жидкости вязкостью 0,157 П·с.

Анализ графиков на рис. 1, с одной стороны, показывает, как зависит скорость фильтрования (м/с) через названные фильтровальные материалы, с другой стороны, указывает на то, что при условии непроникновения частиц осадка через фильтрационную перегородку, целесообразно использовать фильтр-ткань, близкую по гидравлическим характеристикам к фетру.

При $\lambda_0 \gg \lambda_n$ и $\Delta x_0 \gg \Delta x_n$ произведением $\lambda_n \Delta x_n$ можно пренебречь, тогда выражение (10) можно представить

$$Q = \frac{F d^2}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\lambda_0 \Delta x_0}. \quad (11)$$

Выразив из уравнения (11):

$$\frac{d^2}{\lambda_0} = k, \quad (12)$$

получим уравнение закона Дарси для состояний, когда фильтрующий слой является одновременно и фильтровальной перегородкой и осадком:

$$Q = \frac{k F \Delta p}{\mu \Delta x}, \quad (13)$$

где k – коэффициент фильтрации, характеризующий фильтровальную среду и жидкость одновременно (зависит от размера частиц их формы, шероховатости, пористости среды, вязкости фильтруемой жидкости).

Согласно уравнению Козени-Кармана [3]:

$$k = \frac{\varepsilon^3}{c S^2}, \quad (14)$$

где ε – пористость среды; c – константа формы пор; S – удельная поверхность среды.

Приравняв уравнения (12) и (14), имеем

$$\frac{d^2}{\lambda} = \frac{\varepsilon^3}{c S^2},$$

откуда:

$$\lambda = \frac{d^2 c S^2}{\varepsilon^3}. \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает, что коэффициент сопротивления фильтра (фильтрующей перегородки с осадком или осадка без учета фильтрующей перегородки) обратно пропорционален кубу коэффициента пористости фильтровальной перегородки, т.е. чем ниже пористость, тем выше в кубической зависимости коэффициент сопротивления фильтра.

Исходя из уравнения (13) имеем:

$$k = \frac{Q \mu \Delta x}{F \Delta p}. \quad (16)$$

Размерность коэффициента фильтрации k в системе СИ выражается в м².

За единицу коэффициента фильтрации принята единица Дарси (Д; D; d) 1Д = 1,019716 · 10⁻¹² = 1,019716 мкм² [5]. Это внесистемная единица. Она связана с несколькими системами измерений

и выражает проницаемость такой пористой среды, при фильтровании через образец которой площадью 1 см^2 и толщиной 1 см при перепаде давления $\Delta p/\Delta x$ в 1 кгс/см расход жидкости с вязкостью 1 сп составляет $1 \text{ см}^3/\text{с}$.

Промышленный опыт работы и описанные результаты исследований показывают, что в зависимости от природы твердой фракции, осаждаемой на фильтровальной перегородке, осадки могут быть несжимаемыми, частично сжимаемыми и сжимаемыми.

Сжатие осадка снижает его пористость и увеличивает его сопротивление фильтрованию. При отфильтровывании сжимаемого осадка на реальном фильтре, снабженном фильтровальной перегородкой в соответствии с выражением (10) сопротивление фильтра зависит от d ; λ_n ; Δx_n ; λ_0 ; Δx_0 , которые, в свою очередь, в процессе фильтрования в меньшей или большей степени изменяются за счет изменения перепада давлений Δp .

В общем случае зависимость коэффициента сопротивления фильтрованию сжимаемого осадка от перепада давления может выражаться формулой

$$\lambda_0 = \lambda'_0 (\Delta p)^\zeta, \quad (17)$$

где λ'_0 – коэффициент сопротивления осадка при Δp , близких к 0; ζ – экспериментально определяемая постоянная, безразмерная величина, индивидуальная для каждого осадка, с интервалом существования $\zeta = (0 \div 1)$.

При $\zeta = 0$ осадок несжимаем, его сопротивление фильтрованию не изменяется с изменением перепада давления Δp ;

При $\zeta = 1$ давление на фильтре не влияет на выход фильтрата, так как сопротивление осадка при этом пропорционально возрастает.

Для определения конкретных фильтрационных характеристик на примере твердой фазы жидкой картофельной мезги были проведены исследования по изучению структуры осадка мезги, коэффициента проницаемости и скорости фильтрования через слой осадка мезги в интервале давлений $(0-1,2) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Исследования проводили на автоматической фильтрационной установке «AutoFilter» (Германия). Для исследований использовали жидкую картофельную мезгу крахмального завода ОАО «Новая Друть». Предварительно перед исследованиями жидкую мезгу подвергали отстаиванию и доводили до массовой доли сухих веществ в мезге $СВ_{исх} = 5,8 \%$.

В качестве фильтрующей перегородки использовали синтетическую фильтр-ткань толщиной $0,5 \text{ мм}$ с очень низким показателем сжимаемости (менее 5%).

При проведении исследований был сделан ряд допущений.

1. В соответствии с уравнением (10) на основании того, что $\lambda_0 \gg \lambda_n$ и $\Delta x_0 \gg \Delta x_n$ при определении объемного выхода фильтрата Q и коэффициента проницаемости мезги k произведением $\lambda_n \Delta x_n$ пренебрегли, хотя его влияние косвенно в незначительной степени отразилось в значении коэффициента k .

2. Значение массовой доли сухих веществ в соковой воде ($СВ_{со}$) составляло $0,4 \%$. Плотность $\rho_{со}$ составляла $1,001 \text{ г/см}^3$. Как показали исследования, твердая составляющая жидкой картофельной мезги частично тонет, частично всплывает на поверхность жидкой мезги, что свидетельствует о ее средней плотности, близкой к 1.

В связи с изложенным было принято допущение, что плотность твердой части в жидкой мезге: $\rho_{твм} = \rho_{со} = \rho_{в} = 1$. Это позволило при очень небольших погрешностях значительно упростить расчеты за счет идентификации значений массы и объема этих компонентов.

3. В связи с тем, что высота столба фильтруемой мезги в экспериментальном стакане имела максимальное значение $5,8 \text{ см}$ (58 мм), что составляло около $0,5 \%$ от внешнего давления фильтрования, значение пьезометрического давления в расчете влияния давления на фильтрационные характеристики мезги не учитывалось.

4. Поскольку пространство под фильтрующей перегородкой свободно сообщалось с атмосферным давлением в процессе всего периода исследований, перепад давления Δp был равен внешнему давлению фильтрования, создаваемому компрессором и задаваемому на фильтрационной установке.

Использованный нами метод определения фильтрационных характеристик осадка жидкой картофельной мезги предусматривал следующую последовательность проведения исследований:

1. Исходную мезгу с соответствующими ей показателями в количестве $m_{исп}$ загружали в экспериментальный стакан установки AutoFilt, герметически закрывали стакан и автоматически мгновенно создавали над объемом мезги требуемое давление воздуха в интервале значений $(0-1,2) \cdot 10^5$ Па через каждые $0,2 \cdot 10^5$ Па. Образцы мезги выдерживали под заданным давлением Δp_i до тех пор, пока из него не прекращала выделяться соковая вода.

2. При каждом конкретном значении давления Δp_i с помощью мерного цилиндра определяли количество отфильтрованной соковой воды из мезги m_{co} – от m_{co0} до m_{coi} .

3. По разнице $(m_{исп} - m_{coi}) = m_{mi}$ определяли остаточное количество мезги в экспериментальном стакане после i -го фильтрования под i -м Δp .

4. По количеству m_{mi} определяли толщину слоя мезги Δx_i в стакане после i -го фильтрования под i -м Δp по формуле

$$\Delta x_i = \frac{V_{mi}}{F_{ст}} = \frac{m_{mi}}{F_{ст}}.$$

5. На основании уравнения баланса сухих веществ в исходной мезге по уравнению

$$m_{тв.м} = \frac{m_{м.исх} (CB_{исх} - CB_{co})}{100 - CB_{co}} \quad (18)$$

определили массу твердых компонентов в жидкой мезге. Для всех значений Δp_i при одинаковом значении $m_{исх}$ количество твердых компонентов мезги в фильтруемом образце оставалось постоянным $m_{тв.м} = \text{const}$.

6. Исходя из определения «Пористость осадка – это безразмерная величина, характеризующая отношение объема пор к объему твердой фракции осадка» по формуле определяли пористость для каждого значения Δp_i :

$$\varepsilon_i = \frac{m_{mi} - m_{тв.м}}{m_{тв.м}}. \quad (19)$$

7. На осадки мезги, полученные в стакане при каждом значении давления Δp_i , и имеющие приобретенные значения Δx_i и ε_i , наливали одинаковое количество чистой воды при температуре 20°C в объеме V_b и при этом же давлении Δp_i определяли продолжительность фильтрования данного объема воды, получая значения продолжительности фильтрования от $\tau_{\phi 0}$ до $\tau_{\phi i}$.

8. Объемный расход воды через фильтр (через слой осадка с фильтрующей перегородкой) площадью F , равной площади стакана F_c определяли по формуле

$$Q = \frac{V_b}{\tau_{\phi i}}. \quad (20)$$

9. Скорость фильтрования определяли по формуле

$$v_{\phi i} = \frac{Q_i}{F_c}. \quad (21)$$

10. Выполнив все подстановки значений величин в системе СИ, определяли коэффициент фильтрации (коэффициент проницаемости) мезги в м^2 для каждого Δp_i :

$$k_i = \frac{Q_i \mu \Delta x_i}{F_c \Delta p_i}. \quad (22)$$

11. Выполнив пересчет путем деления полученных значений k_i на коэффициент 1,019716, получили значения k_i в ед. Дарси.

На рис. 2–6 представлены графические зависимости показателей, характеризующих фильтрационные свойства картофельной мезги от давления фильтрования Δp .

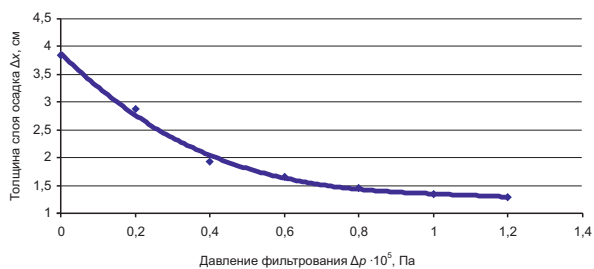


Рис. 2. Зависимость толщины слоя осадка мезги Δx на фильтровальной перегородке от давления фильтрации

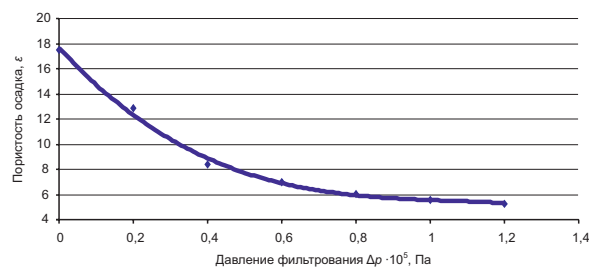


Рис. 3. Зависимость пористости осадка мезги ϵ на фильтровальной перегородке от давления фильтрации

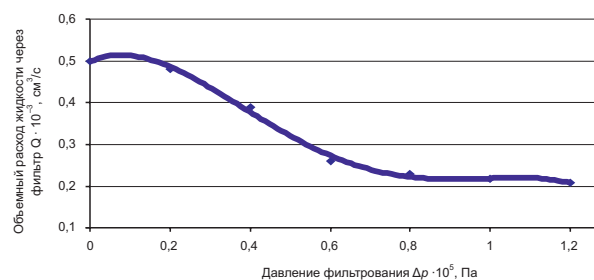


Рис. 4. Зависимость объемного расхода жидкости (воды) Q через слой осадка площадью 78 см^2 от давления фильтрации, при котором сформирован осадок

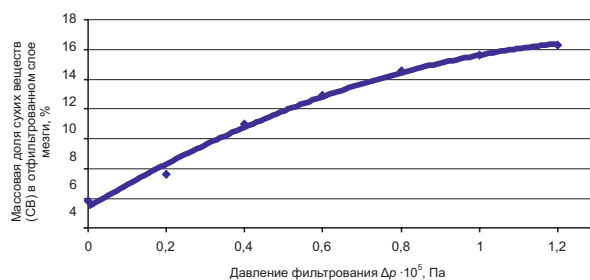


Рис. 5. Зависимость массовой доли сухих веществ в слое мезги на фильтрующей перегородке от давления фильтрации

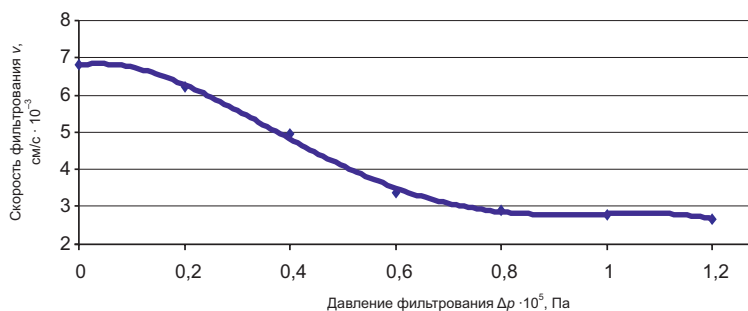


Рис. 6. Зависимость скорости фильтрации через осадок на фильтрующей перегородке от давления фильтрации

Зависимость коэффициента проницаемости осадка мезги на фильтрующей перегородке от давления фильтрации представлена в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость коэффициента фильтрации осадка мезги на фильтрующей перегородке от давления фильтрации

Коэффициент фильтрации, $k \cdot 10^{-3}$, Д	Давление фильтрации, $p \cdot 10^5$, Па
433	0
168	0,2
23	0,4
9,2	0,6
5,3	0,8
3,8	1,0
2,8	1,2

Выводы

1. Осадок, полученный при выделении плотной фракции картофельной мезги путем фильтрации, является сжимаемым. Так, при повышении давления фильтрации над осадком до

$1,2 \cdot 10^5$ Па объем осадка уменьшается более чем на 65 % (см. рис. 2), при этом его пористость уменьшается до 70 % (см. рис. 3).

2. Объемный расход жидкости (воды) Q , отфильтровываемый через осадки мезги, сформированные при различных давлениях фильтрования Δp , падает по мере увеличения давления, асимптотически приближаясь к некоторому значению Q , близкому к величине $Q = 2,2 \cdot 10^5$ см³/с через площадь фильтрации 1 см². То есть, процесс фильтрования переходит в режим, когда объемный расход жидкости через фильтр и скорость фильтрования стремятся к некоторым постоянным значениям за счет изменения фильтрационных характеристик осадка независимо от увеличения перепада давления фильтрования Δp (см. рис. 4, 6). Это указывает на то, что изменение сопротивления фильтрованию осадка картофельной мезги подчиняется закону, представленному формулой (17), при этом показатель степени ζ достигает значения 1 при давлениях Δp , близких к $(1,3-1,4) \cdot 10^5$ Па. Данный результат исследований означает, что выделение плотной фракции мезги методом фильтрования целесообразно вести при давлении фильтрования не более $(1,2-1,4) \cdot 10^5$ Па до толщины осадка на фильтровальной перегородке 1–1,2 см, поскольку увеличение давления не дает увеличения объемного выхода отфильтровываемой жидкости, а фильтрование с увеличением толщины слоя осадка ведет к снижению выхода фильтрата и скорости фильтрования.

3. Коэффициент проницаемости осадка, образуемого плотной фракцией картофельной мезги, наиболее чувствителен к давлению, при котором формируется осадок и протекает процесс фильтрования (см. табл. 2). Кратность его снижения в интервале перепада давлений $(0,2-1,2) \cdot 10^5$ Па достигает 60.

4. Оптимальной массовой долей сухих веществ в осадке твердой фракции картофельной мезги, полученной путем фильтрования, можно считать 15–17 % (см. рис. 5).

На основании результатов проведенных исследований и учитывая то, что ценным компонентом картофельной мезги является ее твердая фракция, для конкретных условий обезвоживания жидкой картофельной мезги методом фильтрования можно рекомендовать использовать или непрерывный процесс вакуумного фильтрования с отделением осадка мезги с поверхности вакуум-фильтра или осуществлять процесс фильтрования на саморазгружающихся камерных фильтр-прессах; вести процесс фильтрования при давлениях, не превышающих значения $(1,3-1,4) \cdot 10^5$ Па, до толщины слоя осадка на фильтровальной перегородке 1,5 см.

Литература

1. Касаткин, А. Г. Процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – С. 784.
2. Плаксин, Ю. М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю. М. Плаксин, Н. Н. Малахов, В. А. Ларин. – М.: Колос, 2007. – С. 269–278.
3. Бабеньшев, С. П. Моделирование мембранных процессов жидких систем / С. П. Бабеньшев, П. С. Чернов, Д. С. Мамай // Науч. журнал Кубан. ГАУ. – 2012. – № 76 (02).
4. Закон Дарси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://frutmrut.ru/zakon-filtracii-darsi/>. – Дата доступа: 18.02.2015.
5. Деньгуб, В. М. Единицы величин: словарь-справ. / В. М. Деньгуб, В. Г. Смирнов. – М.: Издательство стандартов, 1990. – С. 41.
6. Ловкис, З. В. Фильтрационные характеристики картофельной мезги / З. В. Ловкис, А. В. Куликов, М. П. Шабета // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2012. – № 3. – С. 40–47.

Z. V. LOVKIS, M. P. SHABETA

FILTRATION OF FLUID SUSPENSIONS IN FOOD TECHNOLOGIES

Summary

The article deals with the theoretical bases for filtration of fluid suspensions in food technologies. The research on determining filtration characteristics of suspensions has been conducted using the example of liquid potato pulp. Obtained is the dependence of thickness of a residue layer of the suspension solid phase on the filtrated partition, residue porosity, filtration speed, the coefficient of the suspension residue permeability and dry solids weight ratio in the residue layer on the filtrated partition on filtration pressure.