

УДК 637.3

## **ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫРНОЙ ПЫЛИ НА ПРОЦЕСС ФИЛЬТРОВАНИЯ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ**

**О. И. Кравец, М. Н. Шинкарик**

Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя,  
46001 Украина, г. Тернополь, ул. Русская 56, тел.(факс): +380-35-225-49-83,  
электронная почта: univ@tu.edu.te.ua

Существующие технологии переработки молочной сыворотки включают ее предварительную очистку от белковой дисперсной фазы – сырной пыли. Однако, несмотря на определенные наработки в направлении очистки сыворотки сегодня еще нет единого подхода к решению этой проблемы. Подтверждением такого положения вещей является тот факт, что основная часть молочной сыворотки не очищается и не применяется.

В то же время один из самых простых путей очистки сыворотки это фильтрования. В связи с относительно большим содержанием сырной пыли в сыворотке, в процессе ее очистки на фильтровальной поверхности будет образовываться слой осадка. В таком случае, эффективность процесса зависит от реологических свойств сырной пыли, в частности фильтрационных и адгезионных. Целью работы является определение влияния фильтрационных и адгезионных свойств сырной пыли на процесс фильтрования молочной сыворотки.

Исследования фильтрационных свойств сырной пыли проводили с использованием основных положений теории фильтрационной консолидации. В исследованиях адгезионных свойств адгезии рассматривавшего как процесс, который проходит во времени при возникновении или нарушении контакта поверхностей двух разнородных тел.

Получили значение удельного сопротивления фильтрованию, коэффициента консолидации и удельной силы адгезии сырной пыли. В результате обработки этих данных предложены аналитические уравнения,

описывающие изменение фильтрационных и адгезионных характеристик сырной пыли в процессе фильтрования сыворотки.

Полученные результаты могут быть использованы в математическом моделировании процесса фильтрования дисперсных систем на основе молочного белка. Также их можно использовать при разработке систем регенерации фильтрующих поверхности фильтров для очистки сыворотки.

**Ключевые слова:** молочная сыворотка, сырная пыль, фильтрация, адгезия, фильтрационные свойства.

Практически все существующие на сегодня технологии переработки сыворотки, от сушки до мембранных методов, предусматривают предварительную очистку сыворотки от белковой дисперсной фазы – сырной пыли. Дополнительным эффектом очистки сыворотки является возвращение в технологический процесс значительной части молочного белка в виде сырной пыли.

Стоит также обратить особое внимание на экологическую составляющую необходимости организации очистки сыворотки. Сыворотка содержит значительное количество способных к окислению органических веществ [1], в результате чего, ее негативное воздействие на окружающую среду в 500-1000 раз превышает сточные воды [2].

В настоящее время есть определенные наработки в направлении очистки молочной сыворотки от сырной пыли [3], однако единый подход к решению этой проблемы отсутствует. Подтверждением такого положения вещей является тот факт, что основная часть молочной сыворотки не очищается и не применяется [4]. Это связано с тем, что современные методы очистки сыворотки являются или несовершенными или не доступными для большинства предприятий.

В то же время один из самых простых путей очистки сыворотки это фильтрование. Нами было установлено, что с помощью фильтрования можно

отделить от 50 до 80% сырной пыли [5], и предложены конструкции соответствующих аппаратов [6, 7].

В связи с относительно большим содержанием сырной пыли в сыворотке, в процессе ее очистки на фильтровальной поверхности будет образовываться слой осадка. В таком случае эффективность процесса фильтрования сыворотки зависит от реологических свойств сырной пыли, в частности фильтрационных и адгезионных.

Целью работы является определение влияния фильтрационных и адгезионных свойств сырной пыли на процесс фильтрования молочной сыворотки.

В исследованиях использовали сырную пыль, полученную при производстве творога жирностью 9% (ГОСТ Р 52096-2003 “Творог. Технические условия”).

Исследования фильтрационных свойств сырной пыли проводили с использованием основных положений теории фильтрационной консолидации, разработанной в механике грунтов [8]. Суть методики исследований фильтрационных свойств сырной пыли заключалась в том, что определение параметров проводилось в тонком слое продукта (7-10 мм) при ступенчатом увеличении давления.

При фильтровании сыворотки через слой осадка важным параметром является удельное сопротивление фильтрования:

$$r = \frac{H\tau}{\mu v h} - \frac{R}{h} \quad (1)$$

где  $H$  – гидродинамический напор, м;

$\tau$  – время, с;

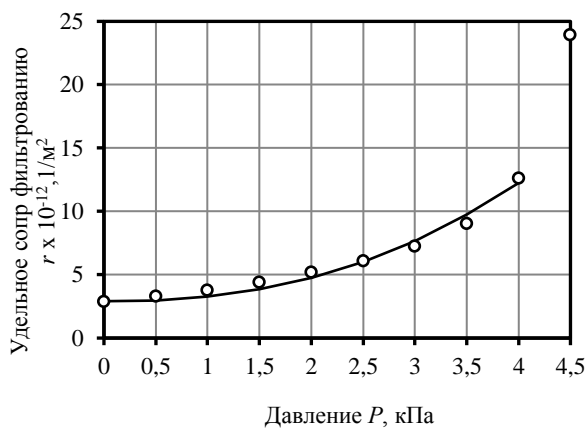
$\mu$  – динамическая вязкость молочной сыворотки, Па·с;

$v$  – удельный объем сыворотки, который проходит через слой сырной пыли, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;

$h$  – высота слоя сырной пыли, м;

$R$  – сопротивление фильтровальной поверхности, 1/м.

В результате обработки экспериментальных данных получили значения удельного сопротивления фильтрованию при давлении от 0 до 5 кПа. Эти данные представлены в виде графической зависимости на рис. 1.



**Рис. 1.**

Таким образом, установлено, что при давлении 4,0 кПа и более наблюдается интенсивный рост удельного сопротивления фильтрованию.

В результате обработки опытных данных, получили аналитическую зависимость величины удельного сопротивления фильтрованию сырной пыли от давления в диапазоне от 0 до 4,0 кПа:

$$r = r_0 \left( 1 + 0,364 \cdot 10^9 \left( \frac{P}{p} \right)^{2,43} \right), \quad (1)$$

где  $r_0 = 2,91 \times 10^9$  – значение удельного сопротивления фильтрованию сырной пыли при отсутствии давления,  $1/м^2$ ;

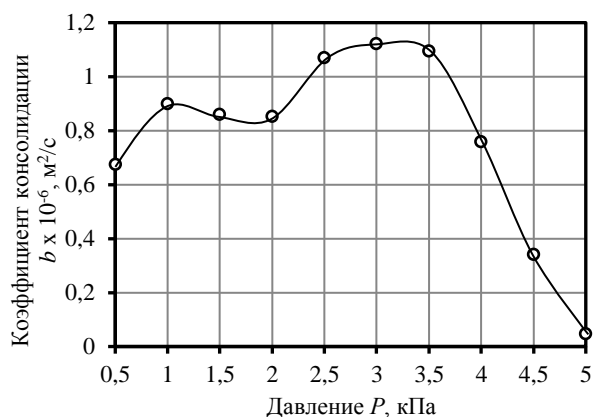
$p = 1,0$  – опытная константа, кПа.

Комплексной оценкой компрессионно-фильтрационных свойств является коэффициент консолидации:

$$b = \frac{G}{\mu \cdot r}$$

где  $G$  – модуль сжимаемости, Па.

Результаты исследований коэффициента консолидации сырной пыли представлены на рис. 2.



**Рис. 2.**

Исходя из графической зависимости коэффициента консолидации сырной пыли от давления, можно сделать следующие предположения. При давлении до 2,5 кПа, коэффициент консолидации меняется только в результате переориентации частиц. При давлениях от 2,5 до 4,5 кПа начинается упругое уплотнение скелета и коэффициент консолидации достигает максимального значения. При давлении более 4,5 кПа начинается пластическая деформация частиц сырной пыли, и коэффициент консолидации резко снижается.

В исследованиях адгезионных свойств сырной пыли адгезию рассматривали как процесс, который проходит во времени при возникновении или нарушении контакта поверхностей двух разнородных тел. С целью количественной оценки адгезии использовали удельную силу адгезии, которую определяли как силу, приложенную перпендикулярно к пластине и достаточную для отрыва пластины от поверхности сырной пыли.

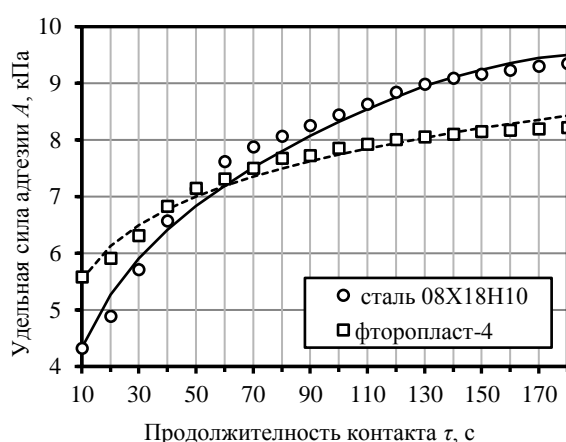
Были проведены исследования зависимости удельной силы адгезии от величины предварительного давления и длительности контакта, которые характеризуют соответственно напор и продолжительность процесса фильтрации.

В исследованиях использовали разработанную экспериментальную установку, которая позволяет изменять указанные параметры в широких пределах.

Температура сырной пыли составляла 20°C. Толщина слоя сырной пыли –  $1,5 \times 10^{-2}$  м, площадь пластины –  $5 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, скорость роста усилия отрыва –

1 Н/с. При выборе материалов пластин авторы исходили из распространенность в пищевой промышленности и остановились на стали 08Х18Н10 и фторопласте-4.

При исследовании зависимости удельной силы адгезии от продолжительности контакта последнюю изменяли в пределах от 10 до 180 с. с интервалом 10 с. Величина давления предварительной нагрузки составляла 1,0 кПа. В результате исследований получена графическая зависимость величины адгезионной прочности сырной пыли от продолжительности контакта, которая представлена на рис. 3.



**Рис. 3.**

Характерно то, что при продолжительности контакта до 60 с. удельная сила адгезии имеет большее значение при контакте сырной пыли с фторопластом, а при длительности контакта более 60 с. – при контакте со сталью.

Математические зависимости удельной силы адгезии от продолжительности контакта ( $0 < \tau < 300$ с) по отношению к стали и фторопласту соответственно имеют следующий вид:

$$A = 2,253\tau^{0,284}, \quad (2)$$

$$A = 3,96\tau^{0,145}. \quad (3)$$

Зависимость удельной силы адгезии от величины давления предварительной нагрузки исследовали при продолжительности контакта 30 с. Результаты исследований представлены в виде графика на рис. 4.

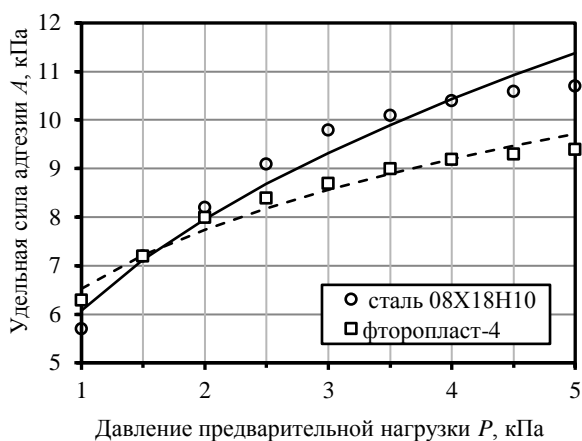


Рис. 4.

Установлено, что изменение удельной силы адгезии в зависимости от давления предварительной нагрузки ( $0 < P_k < 8,0$  кПа) описывается следующими уравнениями по отношению к стали и фторопласту соответственно:

$$A = 5,91P^{0,49}, \quad (4)$$

$$A = 6,525P^{0,247}. \quad (5)$$

В процессе формирования адгезионной связи сырной пыли с твердыми поверхностями можно отметить три стадии. В течение первой стадии происходит образование площади номинального контакта, заполнения неровностей поверхности и формирование площади фактического контакта. Первая стадия формирования адгезии непосредственно связана с упругими свойствами сырной пыли. Движущей силой формирования фактической площади контакта может быть внешнее давление, гидродинамический напор при фильтровании через перегородку или собственный вес продукта. Характерным для первой стадия является стремительный рост во времени величины удельной силы адгезии. Переход с первой стадии во вторую характеризуется точкой перегиба: рост адгезии в этой точке значительно замедляется. На третьей стадии процесса удельная сила адгезии остается почти постоянной, т.е. можно констатировать, что контакт полный.

### Выводы

По фильтрационным характеристикам сырную пыль можно отнести к сжимаемым осадкам, которым присуще удельное сопротивление

филтрованію. Інтенсивний рoст удельного сопротивлення филтрованію сырної пыли связан с деформацией нижних слоев осадка, которая наблюдается при давлении 4,0 кПа и более.

Полученные данные свидетельствуют, что сырная пыль обладает значительной удельной силой адгезии, значение которой стремительно увеличивается в течение первых 60-и с контакта.

Результаты исследований реологических свойств сырной пыли могут быть использованы в математическом моделировании процесса филтрования дисперсных систем на основе молочного белка. Также полученные данные можно использовать при разработке систем регенерации филтрующей поверхности филтров для очистки сыворотки.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко Э.Ф. Экологические и экономические аспекты переработки молочной сыворотки // Молочная промышленность. – 2006. – №6. – С. 20.
2. Сафонов М.С. Молочная сыворотка – источник кормового белка // Ценовник. – 2010. – №10. – С.10-12.
3. Приболотный А.В. Первичная обработка сыворотки, или как заработать на ней деньги // Молочная промышленность. – 2009. – №6. – С. 23.
4. Молочна сироватка. Сучасні технології переробки // Молочна промисловість. – 2008. – №3. – С. 22.
5. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Аналіз гранулометричного складу сирної пилуки // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2011. – №40. – С. 266.
6. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Деклараційний патент на корисну модель «Фільтр для очищення сироватки від білка». 8062 Україна // 2005. №7.
7. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Деклараційний патент на корисну модель «Фільтр для відділення молочного білка від сироватки». 22756 Україна // 2007. №5.



8. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1979. – 272с.

#### REFERENCES

1. Kravchenko Je.F. // *Molochnaja promyshlennost'*. – 2006. – №6. – S. 20.
2. Safonov M.S. // *Cenovnik*. – 2010. – №10. – S.10-12.
3. Pribolotnyj A.V. // *Molochnaja promyshlennost'*. – 2009. – №6. – S. 23.
4. *Molochna promislovist'*. – 2008. – №3. – S. 22.
5. Shinkarik M.M., Kravec' O.I. // *Naukovi praci Odes'koї nacional'noї akademii harchovih tehnologij*. 2011. – №40. – S. 266.
6. Shinkarik M.M., Kravec' O.I. Deklaracijnij patent na korisnu model' «Fil'tr dlja ochishhennja sirovatki vid bilka». 8062 Ukraїna // 2005. №7.
7. Shinkarik M.M., Kravec' O.I. Deklaracijnij patent na korisnu model' «Fil'tr dlja viddilennja molochnogo bilka vid sirovatki». 22756 Ukraїna // 2007. №5.
8. Cytovich N.A. *Mehanika gruntov (Soil mechanics)*. – М.: Vysshaja shkola, 1979. – 272s.

### **THE INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE CHEESE DUST PROCESS FOR FILTERING WHEY**

**O.I. Kravec', M.M. Shinkarik**

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 46001 Ukraine, Ternopil,  
Ruska str., 56,. tel.(fax) +380-35-225-49-83, e-mail: univ@tu.edu.te.ua

The results of studies of the rheological characteristics of the cheese dust - specific resistance to filtration, consolidation ratio and specific adhesion force. The analytical equations that describe the change in filtration and adhesion characteristics of cheese dust during the filtration of whey.

**Key words:** whey, cheese dust, filtration, adhesion, filtration properties.