

УДК 637.053

# Расчет реологических характеристик творога, получаемого ультрафильтрацией

П.Н.ПЯТКИН, О.А.АЛЮХАНОВА, д-р техн. наук В.Н.ВОДЯКОВ,  
канд. техн. наук С.Б.СЫСУЕВ  
МГУ им. Н.П. Огарева  
Д-р техн. наук В.А.ЛЯЛИН  
ООО «Фильтропор Групп»

Производство творога методом ультрафильтрации сквашенного молока находит все большее применение в молочной промышленности. Его повышенные функциональные свойства (за счет полного сохранения сывороточных белков) и существенная экономия молока делают метод привлекательным как для покупателей, так и производителей. Продукт необходим для полноценного питания детей послегрудничкового периода (прикорма) и раннего возраста, с успехом используется в питании больных и ослабленных людей, а также для массового потребления.

ООО «Фильтропор Групп» изготовило и поставило ряд многосекционных установок для производства такого творога (65, 350, 950 кг/ч). Установка производительностью 65 кг/ч успешно эксплуатируется, в частности, с 2002 г. в цехе детского питания ОАО «Молочный завод «Наро-Фоминский». Однако при разработке таких установок возникает ряд задач, успешность решения которых существенным образом определяет эффективность ультрафильтрационных процессов. Одной из главных является минимизация толщины и скорости образования осадка на поверхности мембраны, которые в первую очередь зависят от реологических свойств обрабатываемых сред.

В задачу проектного расчета многосекционных установок непрерывного действия входит определение площади поверхности мембран, оптимального числа последовательных секций и их гидродинамического сопротивления, оптимальных значений трансмембранных давлений, потоков пермеата и концентрата. Также необходимо знать реологические характеристики казеина и творога с различным содержанием сухих веществ и при разных температурах. Детальные исследования в этой области не проводились. Отсутствие конкретных реологических уравнений и характеристик затрудняет расчет и проектирование процессов и оборудования для получения творога ультрафильтрацией сквашенного молока.

Системы уравнений, описывающие при математическом моделировании процессы переработки, включают реологические (определяющие) уравнения, характеризующие связь деформаций (скоростей деформаций) с напряжениями. В них как необходимый элемент входят реологические параметры материала в виде материальных констант или функций. Реологические исследования позволяют получить значения констант, а фундаментальные реологические концепции (уравнения) предсказывают, каким образом понимать результаты исследований и как их использовать для решения прикладных задач. Однозначные физически зна-

чимые количественные оценки реологических свойств вещества коррелируют со структурой материала и могут использоваться для ее характеристики.

Значительная часть пищевых продуктов [2, 5], в том числе творог и другие консистентные молочные продукты, относятся к тиксотропным материалам. Они отличаются сложностью внутренней структуры, из-за чего их реологическое поведение в процессах переработки не подчиняется закону внутреннего трения Ньютона с единственной физической константой – вязкостью. При этом тиксотропность (обратимое снижение эффективной вязкости из-за изменения белковых структур) обусловлена диссипацией механической энергии. В общем случае динамическая вязкость  $\eta$  таких сред является функцией скорости деформации  $\dot{\gamma}$ , температуры  $T$  концентрации  $x$  и длительности деформирования  $t$ :

$$\eta = f(\dot{\gamma}, T, x, t).$$

Рассмотрим один из аспектов проблемы – исследование реологических свойств нежирного мягкого творога, используемого для детского питания, на разных стадиях его получения ультрафильтрацией сквашенного молока. Коагуляцик белков проводили кислотным методом. В эксперименте использовались керамические элементы фирмы «Тамп Дойчланд» (Германия) с размером пор 0,2 мкм и площадью фильтрации 0,2 м<sup>2</sup>. При объемном факторе концентрирования 3,5 общее содержание сухих веществ составляло 17,9 % белков (включая сывороточные) – 10,8, жира – менее 1 %

Реологическое поведение проб творога (с концентрациями 6,1, 7,9, 10,1, 12, 15,7, 17,9) исследовано в области температур 293–323 К на разработанном комбинированном ротационном вискозиметре [3] в двух режимах: постоянного момента ( $M = \text{const}$ ) в диапазоне скоростей сдвига  $\dot{\gamma} = 0-100 \text{ с}^{-1}$  постоянной угловой скорости ротора ( $\omega = \text{const}$ ) в диапазоне  $\dot{\gamma} = 100-1000 \text{ с}^{-1}$ . Вискозиметр предназначен для исследования реологических характеристик пищевых материалов и позволяет совмещать измерение вязкости с изучением упругости, релаксации напряжений и тиксотропии в рамках оценки структурности консистентных сред. Он включает измерительный блок, асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью 180 Вт, жидкостный термостат, частотно-регулируемый привод (SV 004 iG5-1, фирма LG) с диапазоном регулиро-

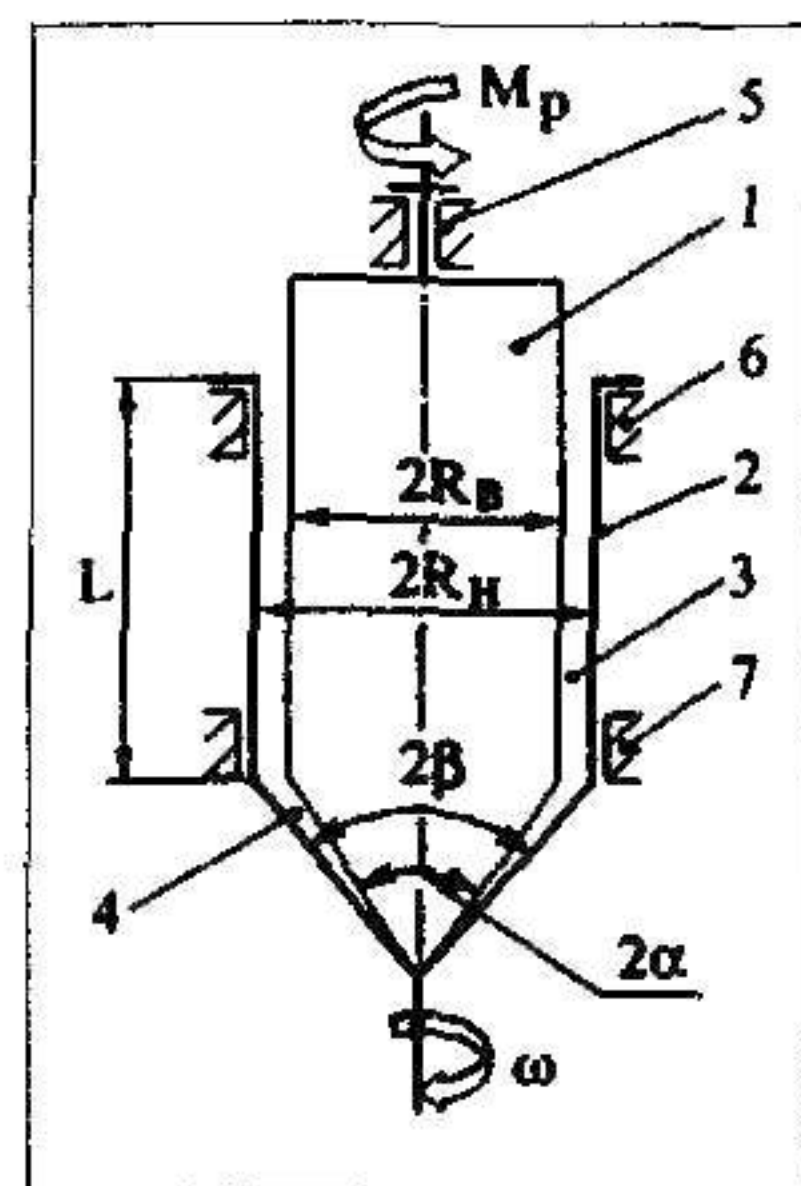


Рис. 1. Расчетная схема измерительного блока вискозиметра ( $2R_в = 32 \text{ мм}$ ;  $2R_н = 33 \text{ мм}$ ;  $L = 105 \text{ мм}$ ;  $2\alpha = 66^\circ$ ;  $2\beta = 68^\circ$ ): 1, 2 – внутренний и внешний цилиндры; 3 – кольцевой измерительный зазор; 4 – конический измерительный зазор; 5, 6, 7 – подшипники



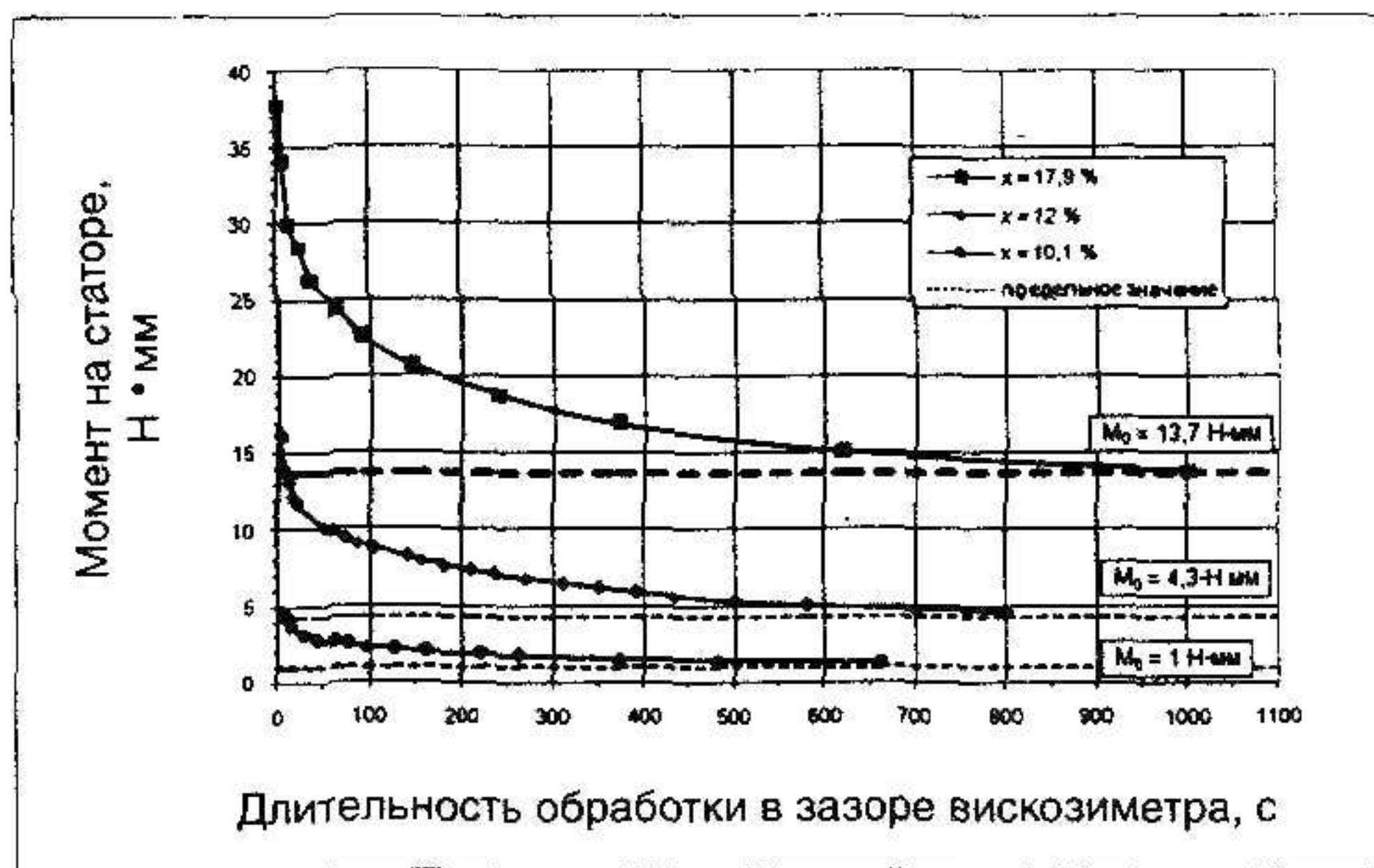


Рис. 2. Тиксотропное изменение структуры творога

вания частоты вращения электродвигателя от 1 до 1500 об/мин, персональный компьютер, оснащенный многофункциональной платой сбора данных PCI 6040E фирмы NI (USA). Управление ходом эксперимента и обработка измерительной информации осуществляются посредством виртуального прибора, разработанного в среде LabView 8.0. В режиме статистической обработки собранной информации путем выбора необходимого файла данных и задания временных границ установившегося периода измерения выводится информация о среднем значении вязкости в этом интервале.

Расчетная схема измерительного блока вискозиметра применительно к испытаниям в режиме постоянной угловой скорости приведена на рис. 1.

До измерения вязкости каждый образец творога предварительно обрабатывался в рабочем зазоре вискозиметра при  $T = 298$  К и частоте вращения ротора  $\omega = 30$  с<sup>-1</sup>, соответствующей скорости сдвига  $\dot{\gamma} = 250$  с<sup>-1</sup>, до выхода момента на стационарное (предельное) значение  $M_0$ , отвечающее предположительно полному разрушению белковых структур. Для исследованных образцов творога с ростом концентрации время достижения стационарного значения момента изменялось от 30 до 1300 с.

Типичный вид полученных кривых представлен на рис. 2.

По данным графикам рассчитана удельная работа изменения белковых структур по формуле

$$q = \frac{10^{-3} \omega}{V_0} \left[ \int_0^{t^*} M(t) dt - M_0 t^* \right], \quad (1)$$

где  $V_0 = 7$  см<sup>3</sup> – объем творога в рабочем зазоре вискозиметра;  $M(t)$  – момент на статоре, Н·мм;  $M_0$  – стационарное значение момента, отвечающее состоянию среды с разрушенной структурой, Н·мм;  $t^*$  – длительность деформирования, отвечающая выходу на стационарное значение момента, с.

На рис. 3 представлена построенная по полученным значениям кривая зависимости энергии изменения белковых структур от концентрации.

Из результатов следует, что имеет место существенная зависимость удельной работы изменения белковых структур от концентрации творога: рост концентрации сухих веществ в диапазоне 6,1–17,9 % изменяет удельную работу  $q^*$  от 0,03 до 36 Дж/см<sup>3</sup>. Можно предположить, что установленные



Рис. 3. Зависимость энергии изменения структуры творога от концентрации сухих веществ

при реологических испытаниях значения удельных энергий изменения белковых структур характеризуют когезионную прочность гелевого слоя, отлагающегося на мембране в процессе ультрафильтрации.

Для всех проб в исследованном диапазоне температур, скоростей сдвига и концентраций экспериментальные результаты аппроксимируются уравнением Керри [1] с коэффициентом корреляции не ниже 0,96. При этом зависящими от температуры параметрами являются начальная и конечная вязкости. Для получения более достоверных результатов по реологическим константам, входящим в уравнение Керри, был использован метод приведения к одной температуре  $T_0 = 298$  К и одной концентрации  $x_0 = 0,179$  по уравнению

$$\eta_{T,x}^0 = \eta(T, x) \cdot a_T \cdot a_x, \quad (2)$$

где  $\eta(T, x)$  – эффективная вязкость пробы с концентрацией  $x$  при температуре  $T$ , Па·с;  $a_T = \exp[E(T_0^{-1} - T^{-1})/R]$  и  $a_x = (x_0/x)^m$  – коэффициенты приведения;  $m = 2,7$ .

Поскольку творог представляет собой водную дисперсию белковых структур, следуя работе [4], принято, что энергия активации вязкого течения творожной массы  $E$  соответствует энергии активации воды. Определение последней произведено по уравнению Френкеля – Эйринга [2] по известным данным зависимости вязкости воды от температу-

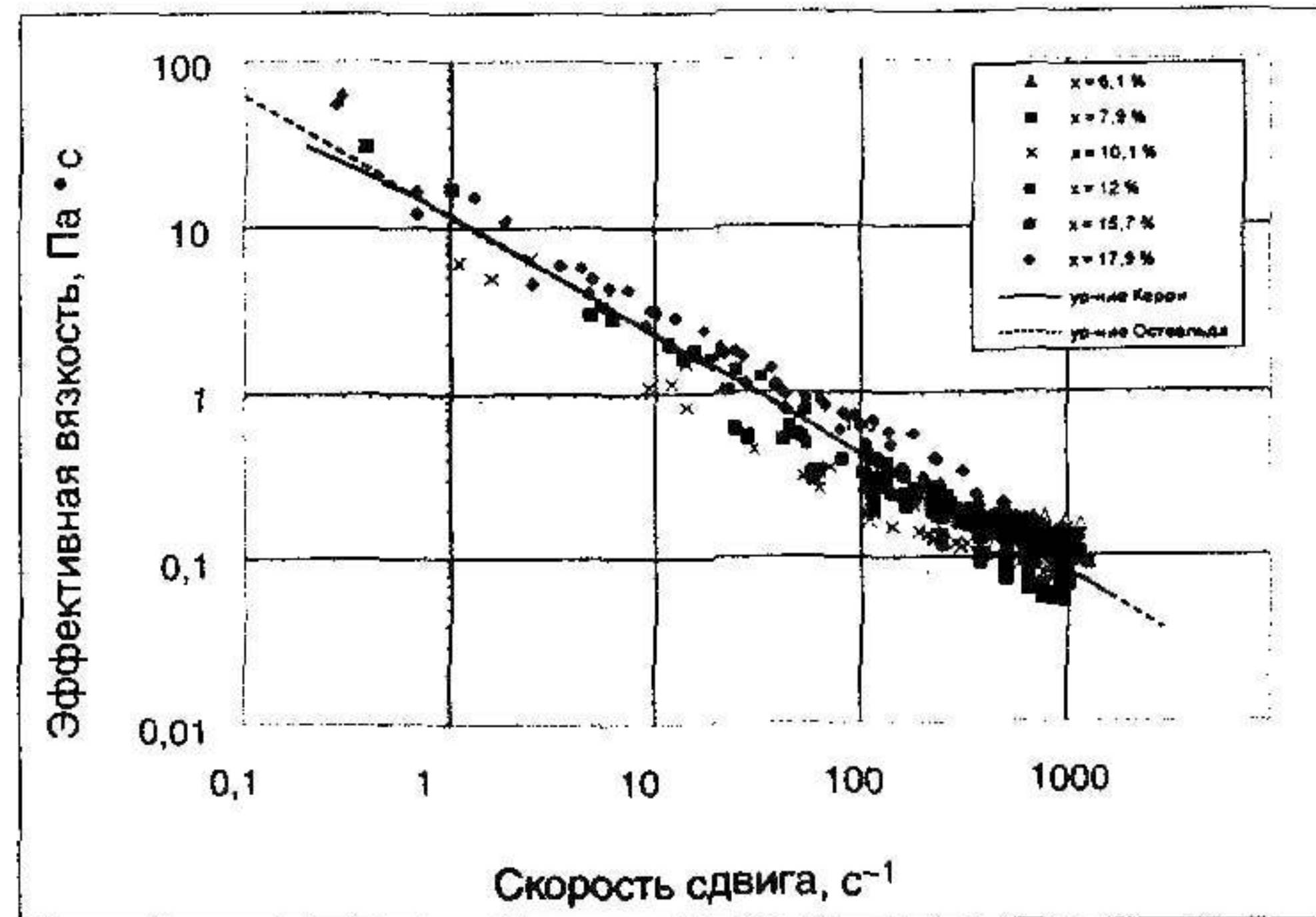


Рис. 4. Инвариантная относительно температуры и концентрации зависимость эффективной вязкости творога от скорости сдвига



ры для диапазона 0–100 °С. Вычисленное указанным образом значение составило 15 410 Дж/(моль · К).

На рис. 4 представлена приведенная к концентрации 0,179 и температуре 298 К экспериментальная зависимость вязкости от скорости сдвига для исследуемых концентраций творога (точки). Здесь же показана аппроксимация экспериментальных результатов уравнениями Керри и Оствальда (линии) соответственно с коэффициентами корреляции 0,92 и 0,90.

Для обобщенных указанным образом экспериментальных результатов зависимость эффективной вязкости творога, полученного методом ультрафильтрации на керамических мембранах с диаметром пор 0,2 мкм, от скорости сдвига (1–1000 с<sup>-1</sup>), температуры (293–323 К) и концентрации (6–18 %) описывается следующим выражением:

– на основе уравнения Керри

$$\eta(\dot{\gamma}, T, x) = \left\{ \eta_k^0 + (\eta_n^0 - \eta_k^0) [1 + (\theta_0 \dot{\gamma})^2]^{-\frac{n-1}{2}} \right\} \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^m; \quad (3)$$

– на основе степенного уравнения Оствальда

$$\eta(\dot{\gamma}, T, x) = k_0 \dot{\gamma}^{n-1} \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^m. \quad (4)$$

При этом приведенные значения реологических констант составляют:  $\eta_n^0 = 40$  Па · с,  $\eta_k^0 = 0,003$  Па · с,  $k_0 = 12$  Па · с<sup>n</sup>;  $E = 15 410$  Дж/(моль · К),  $n = 0,28$ ;  $\theta = 5$  с,  $\dot{\gamma}_0 = 0,179$ ,  $T_0 = 298$  К;  $m = 2,7$ .

Полученные результаты будут использованы для построения на базе программного продукта «COSMOSFloWorks»

[1] нелинейной математической модели неизотермической ультрафильтрации сквашенного молока в многосекционных установках с керамическими мембранными элементами. Практическая реализация модели, по мнению авторов, даст возможность создать эффективную методику расчета аппаратов подобного типа, позволяющую при проектировании мембранных установок закладывать оптимальные технические решения, прямым следствием которых должно явиться снижение стоимости установок при заданной производительности по конечному продукту.

М.И.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Алямовский А.А.** SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А.Алямовский, А.А.Собачкин, Е.В.Одинцов, А.И.Харитонов, Н.Б.Пономарев. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005.
2. **Виноградов Г.В.** Реология полимеров / Г.В.Виноградов, А.Я.Малкин. – М.: Химия, 1977.
3. **Водяков В.Н.** Автоматизация реометрических исследований на базе Lab VIEW / В.Н.Водяков, В.В.Кузнецов, П.Н.Пяткин, С.Б.Сысоев // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде Lab VIEW и технологии National Instruments: сб. трудов VI международной научно–практич. конф. – М.: Изд–во Рос. ун–та Дружбы народов, 2007.
4. **Косой В.Д.** Вязкость молока в зависимости от температуры и состава / В.Д.Косой, М.Ю.Меркулов, С.Б.Юдина // Молочная промышленность. 2003. № 5.
5. **Малкин А.Я.** Реология: концепции, методы, приложения / А.Я.Малкин, А.И.Исаев. – СПб.: Профессия, 2007.