

УДК 633.421

Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Экспериментальное исследование течения зерновых суспензий в трубах

Д-р техн. наук **А.Г. Новоселов**, dekrosh@mail.ru
 канд. техн. наук **Ю.Н. Гуляева**, gulyaeva.yul@yandex.ru
Ю.Л. Малахов, yma@sopura.com
А.А. Смирнов, sm1rnov93@mail.ru

*Университет ИТМО
 191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Канд. техн. наук **А.В. Чеботарь**, anvik436@gmail.ru

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
 (Технический университет)
 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 26*

Определяли коэффициенты динамической вязкости и гидродинамических параметров суспензионных потоков с целью разработки новых машинно-аппаратурных схем, реализующих различные технологии производства продуктов микробиологического синтеза. Исследовали водно-зерновые суспензии, приготовленные на основе ячменного зерна, с гидромодулем 1:4; 1:3,5; 1:3 и 1:2,5. Диапазон температур варьировался от 20 до 90°C при определении коэффициентов динамической вязкости в реологических и от 20 до 80°C в гидродинамических экспериментах. Реологические исследования, проводившиеся на ротационном вискозиметре марки RHEOTEST® RN 4.1 SE, показали, что течение водно-зерновых суспензий подчиняется степенному закону, характерному для псевдопластичных жидкостей. Представлены графические и математические зависимости для расчета коэффициента динамической вязкости в зависимости от температуры, скорости сдвига для всех исследованных гидромодулей. Гидродинамические исследования выполнены на специально созданной экспериментальной установке. Впервые получены графические и математические зависимости для расчета коэффициента трения по длине λ . Рассчитаны параметры консистентных кривых течения и построены сами консистентные кривые водно-зерновых суспензий. Показано, что консистентные кривые можно разбить на три характерные зоны, границы которых определяются величиной температуры и гидромодулем.

Ключевые слова: гидродинамика; водно-зерновая суспензия; гидравлические сопротивления; трубопровод; коэффициент трения; число Рейнольдса.

DOI: 10.17586/2310-1164-2017-10-2-40-49

Rheo- and hydrodynamics of water-grain suspensions. Experimental study of the grain suspensions flow in pipes

D.Sc. **Aleksandr G. Novoselov**, dekrosh@mail.ru
 Ph.D. **Juliya N. Gulyaeva**, gulyaeva.yul@yandex.ru
Yuri L. Malakhov, yma@sopura.com
Artem A. Smirnov, sm1rnov93@mail.ru

*ITMO University
 9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia*

Ph.D. **Anastasia V. Chebotar**, anvik436@gmail.ru

*St. Petersburg State Institute of Technology
 26, Moskovsky ave., St. Petersburg, 190013, Russia*

The article deals with the task of flow of water-grain suspension through the coefficients of dynamic viscosity and hydrodynamic parameters of suspension flows were determined with the aim of developing new machine and instrument circuits implementing various technologies for the production of microbiological synthesis products. Water-grain suspensions prepared on the basis of barley grain were studied with a hydromodule of 1:4; 1:3,5; 1:3, and 1:2.5. While determining the dynamic viscosity coefficients in rheological experiments the temperature range varied between 20 and 90°C and in hydrodynamic ones – between 20 and 80°C. Rheological studies carried out at RHEOTEST® RN 4.1 SE rotary viscomer showed that the flow of water-grain suspensions follow the power law characteristic for pseudoplastic liquids. Graphical and mathematical dependences for calculating the dynamic viscosity

coefficient as a function of temperature and shear rate for all the hydromodules in questionnaire presented. Hydrodynamic studies were performed at the experimental unit designed for the purpose. For the first time graphical and mathematical dependencies for calculating the coefficient of friction along the length λ were obtained. The parameters of consistent flow curves are calculated and the self-consistent curves of water-grain suspensions are constructed. Consistent curves are shown to be divided into three characteristic zones, the boundaries of which are determined by the temperature and hydromodule.

Keywords: hydrodynamics; water-grain suspension; hydraulic resistance; pipeline; friction coefficient; Reynolds number.

Введение

Производство продуктов питания в промышленном масштабе при непосредственном участии микроорганизмов получило широкое распространение в спиртовой, пивоваренной, химико-фармацевтической, топливной и других отраслях. Повышение эффективности технологических процессов и неизбежно связанного с ними аппаратного оформления является важнейшей научно-технической задачей. Решение этой задачи зависит от появления на машиностроительном рынке новых современных производственных комплексов, оснащенных высокоэффективным технологическим оборудованием [1].

В процессе производства пива или этанола одной из важнейших технологических стадий является стадия водно-тепловой и ферментативной обработки (ВТФО) зернового сырья. При проведении этого технологического процесса происходит неоднократное перемещение водно-зерновых суспензий из заторного чана в заторный котел, а также разгрузка этих аппаратов, осуществляемая путем транспортировки суспензий к фильтр-чану.

Оценка гидравлических сопротивлений, возникающих при движении водно-зерновой суспензии, представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит более точно проводить инженерные расчеты при подборе технологического оборудования, работающего в проточном или циркуляционном режиме [2].

В процессе ВТФО водно-зерновой суспензии происходит конверсия исходного материала в целевое сырье, а именно перевод нативного крахмала зерна в его водорастворимые компоненты (глюкозу, сахарозу и т.п.), способные потребляться микроорганизмами на последующих технологических стадиях. Трансформация нативного крахмала обычно осуществляется под воздействием на него повышенных температур, амилолитических ферментов, а также при активном гидродинамическом воздействии жидкой фазы на зерновые частицы (гидродинамическая обработка).

Наличие нерастворимых компонентов зерновых частиц в жидкой фазе не позволяет использовать классические уравнения для проведения расчетов гидравлических сопротивлений, полученных при движении однофазных ньютоновских сред.

В этой связи необходим поиск закономерностей, позволяющих осуществлять гидравлические расчеты трубопроводов при движении по ним водно-зерновой суспензии.

Основной задачей гидродинамики при течении жидкости любой природы является установление зависимости между скоростью движения частиц жидкости и движущей силой, благодаря которой происходит это движение [3 ÷ 5]. На практике это выражается в получении инженерных уравнений, связывающих потребный напор и объемный расход.

Гидравлические сопротивления движению суспензии зависят от геометрического профиля внутренней поверхности коммуникационных трубопроводов, качественного и количественного состава суспензии, а также от расхода суспензии. Обычно при расчете трубопровода его схема и необходимый расход суспензии известны и требуется определить напор, который нужно создать на входе суспензии в него. В этом случае большое влияние на гидравлические сопротивления оказывают физические свойства перекачиваемой суспензии, а именно ее вязкость и плотность.

Ранее [6] нами были представлены результаты первой серии экспериментов, целью которой являлась опытная проверка работоспособности экспериментального стенда с точки зрения получения достоверных данных по определению коэффициента трения по длине λ . В качестве испытуемой жидкости использовалась водопроводная вода, физические свойства которой достаточно хорошо изучены и представлены в справочной литературе [7, 8]. Сравнение полученных нами экспериментальных значений коэффициентов λ со значениями этих коэффициентов, рассчитанных из

известных эмпирических уравнений [4, 8, 9], позволило убедиться в надежности получаемых результатов на данной экспериментальной установке и перейти к изучению течения водно-зерновых суспензий в трубах.

Необходимость проведения исследований по изучению реологических свойств водно-зерновых суспензий показана в первой части данной работы [6], из которой вытекает задача получения данных по вязкости водно-зерновых суспензий.

Экспериментальные исследования реологических свойств водно-зерновых суспензий

Исследования реологических свойств водно-зерновых суспензий заключались в экспериментальном определении коэффициентов динамической вязкости. В качестве твердой фазы для приготовления суспензии использовалось ячменное зерно, измельченное в ножевой дробилке РМ-120 и просеянное через сито с отверстиями 1 мм.

Исследуемый образец ячменной суспензии заданного гидромодуля готовился следующим образом. Непосредственно перед смешиванием с зерном специально подготовленный объем воды доводился до начальной температуры исследований $t_{нач} = 20^{\circ}\text{C}$. Затем в лабораторные стаканы в заданной пропорции вносили соответствующее массовое количество воды и зерна. В течение 2 ÷ 3 минут исследуемый образец тщательно перемешивался, от него отбиралась проба в объеме 30 мл и переносилась в измерительный стакан ротационного вискозиметра RHEOTEST® RN 4.1 SE. В качестве объекта исследований использовалась ячменная суспензия с гидромодулями 1:4; 1:3,5; 1:3; 1:2,5. Для всех исследованных гидромодулей проводились измерения коэффициента динамической вязкости при скоростях сдвига равных: $\dot{\gamma}_1 = 2,04 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_2 = 4,08 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_3 = 6,12 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_4 = 8,16 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_5 = 16,32 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_6 = 26,52 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_7 = 48,96 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_8 = 81,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_9 = 146,88 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{10} = 234,6 \text{ c}^{-1}$; $\dot{\gamma}_{11} = 436,56 \text{ c}^{-1}$. Во всех наших экспериментах температура исследуемых образцов суспензии изменялась от 20 до 90°C с шагом 10°C. Время проведения каждого эксперимента составляло 2000 с.

В результате выполненного комплекса экспериментов были определены значения коэффициентов динамической вязкости водно-зерновых суспензий и получены графические зависимости $\mu = f(\dot{\gamma})$ и $\mu = f(t)$.

Типовой график вязкостно-температурной кривой представлен на рисунке 1. Следует отметить, что характер изменения динамической вязкости, для всех исследованных гидромодулей и указанных выше скоростей сдвига был одинаковым.

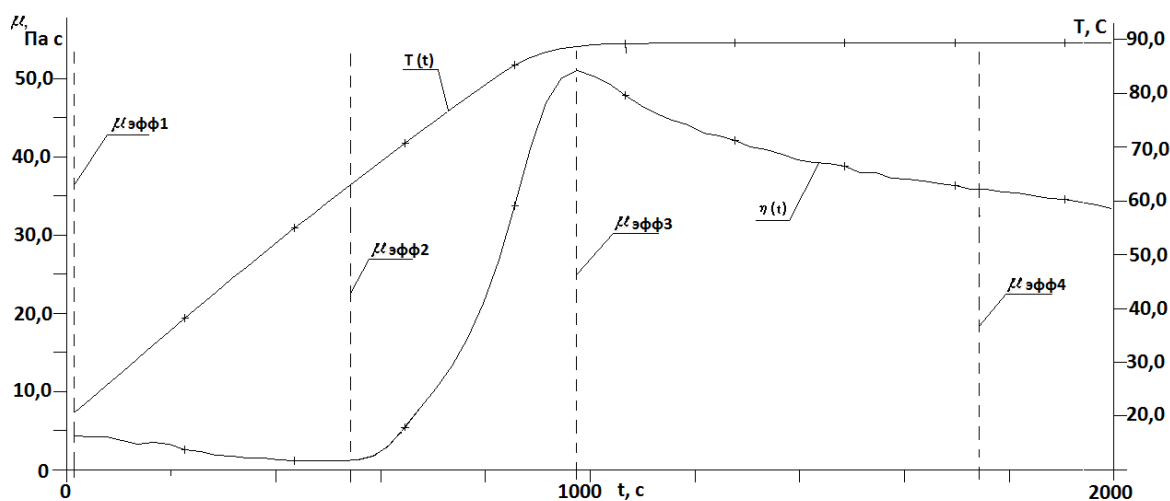


Рисунок 1 – Типовой график коэффициентов эффективной вязкости и зон вязкостно-температурной кривой течения водно-зерновой суспензии

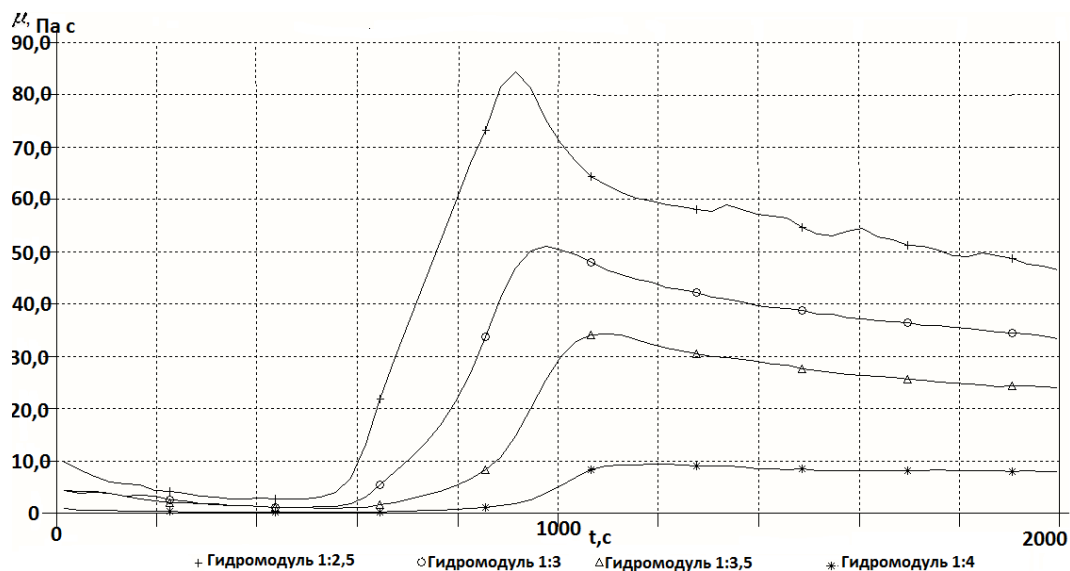


Рисунок 2 – Вязкостно-температурные кривые ячменной суспензии при скорости сдвига $\dot{\gamma} = 16,32\text{c}^{-1}$ для различных гидромодулей

Графическая обработка вязкостно-температурных кривых, полученных для всех указанных выше устанавливаемых скоростей сдвига и температур, позволила получить графики зависимости $\mu = f(\dot{\gamma})$ и линеаризовать их путем построения в логарифмических координатах. На рисунках 3 и 4 показаны зависимости $\mu = f(\dot{\gamma})$ при разных температурах.

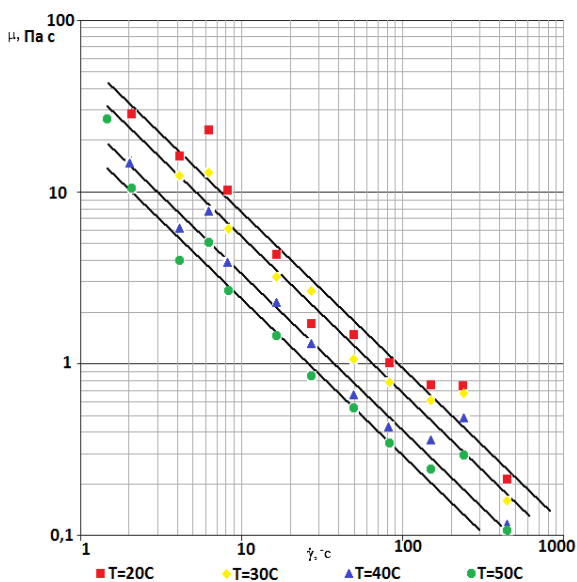


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига для ряда температур в диапазоне от 20 до 50°C (гидромодуль 1:3)

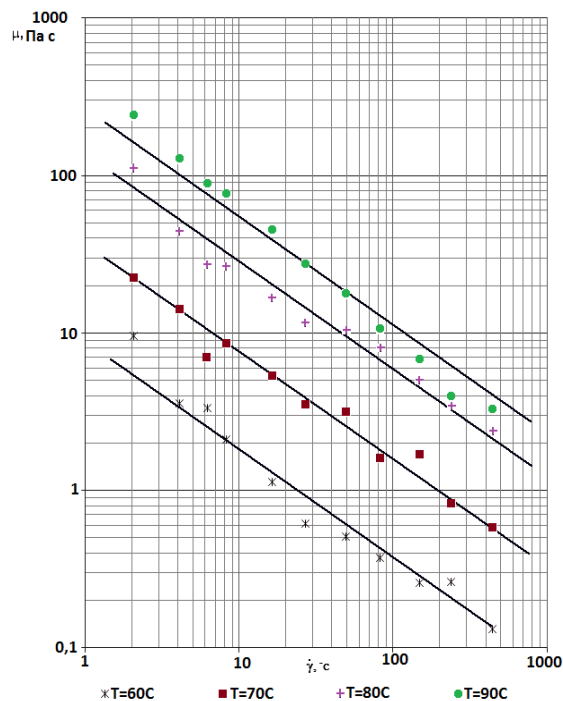


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига для ряда температур в диапазоне от 60 до 90°C (гидромодуль 1:3)

Математическая обработка графических зависимостей, полученных в результате проведения реологического исследования водно-зерновой суспензии, приготовленной на основе ячменного зерна, позволила получить следующие уравнения для двух первых характерных зон вязкостно-температурных кривых, представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Характерных зон вязкостно-температурных кривых

Суспензия	I зона	II зона	K_1	K_2
Гидромодуль 1:4	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,98} \cdot T^{1,7}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,4}}{\dot{\gamma}^{0,85}}$	5479	$5,39 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:3,5	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,932} \cdot T^{1,45}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,54}}{\dot{\gamma}^{0,78}}$	5200	$5,24 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:3	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,875} \cdot T^{1,36}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,89}}{\dot{\gamma}^{0,685}}$	3776	$1,45 \cdot 10^{-15}$
Гидромодуль 1:2,5	$\mu_I = \frac{K_1}{\dot{\gamma}^{0,675} \cdot T^{0,92}}$	$\mu_{II} = \frac{K_2 \cdot T^{8,75}}{\dot{\gamma}^{0,48}}$	685,6	$4,19 \cdot 10^{-15}$

Экспериментальные исследования гидродинамики течения водно-зерновых суспензий

Вторая часть экспериментов заключалась в изучении гидродинамики двухфазных сред в трубах. Эти эксперименты проводились на водно-зерновой суспензии (измельченное ячменное зерно-вода) с целью построения консистентных кривых течения и определения коэффициентов трения по длине λ [6]. Исследования выполнялись на, специально разработанной для этих целей, экспериментальной установке, подробное описание которой представлено в работе [6]. Для удобства читателя на рисунке 5 воспроизведена ее схема. В качестве изучаемой среды использовалась та же ячменная суспензия с гидромодулями 1:4; 1:3,5; 1:3; 1:2,5. Подготовка твердой фазы, а именно измельчение зерна, выполнялась аналогично подготовке зерна при проведении реологических исследований.

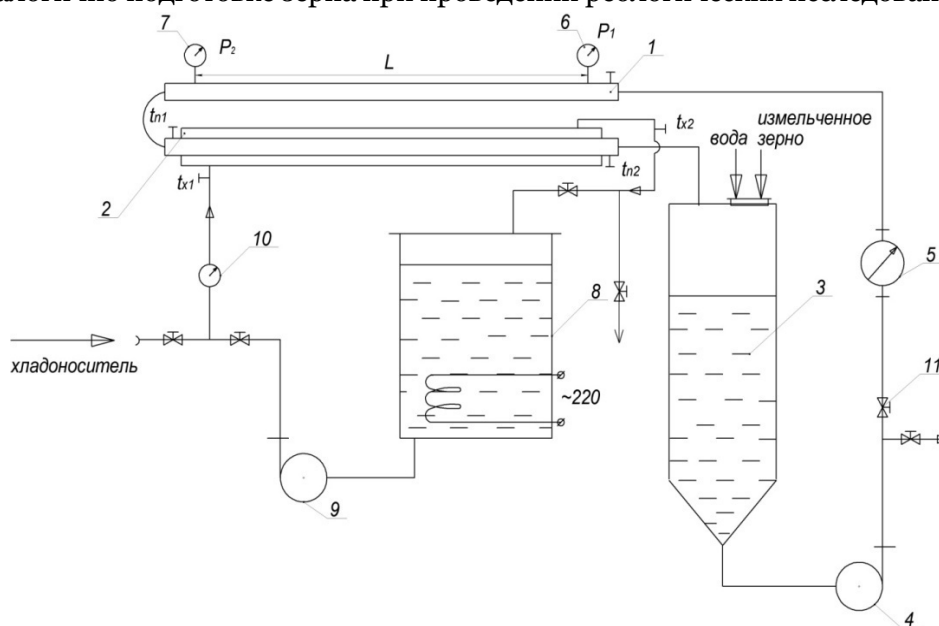


Рисунок 5 – Схематическое изображение экспериментальной установки для определения гидродинамических параметров потока водно-зерновых суспензий

Все эксперименты выполнялись в следующем порядке. В накопительную емкость 3 сначала подавали предварительно измеренное количество воды. Затем пускался насос 4 и вентилем 11 устанавливался минимальный расход воды через установку.

Измельченное зерно ячменя, просеянное через сито с отверстиями 1 мм в требуемом количестве, вносили в накопительную емкость 3 для составления затора исследуемого гидромодуля. При составлении затора с заданными гидромодулями изменялась только масса вносимого зерна. Масса воды оставалась постоянной и равнялась 25 кг. Внесение измельченного зерна осуществлялось при работающем насосе 4 через входной патрубок в верхней крышке накопительной емкости 3.

Далее суспензия нагревалась при помощи двухтрубного теплообменника до начальной температуры опыта равной 20°C. При ее достижении датчиками давления 6 и 7 определялся перепад давлений ΔP на исследуемом участке трубы 1. После этого с помощью вентили 11 изменялся расход суспензии

и измерения повторялись. При этом температура суспензии оставалась постоянной. Изменение расхода суспензии выполнялись в диапазоне $Q = 10 \cdot 10^{-5} \div 260 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. После окончания экспериментов с определением гидравлических сопротивлений при течении суспензии заданного гидромодуля при начальной температуре, суспензия заменялась на тот же самый гидромодуль, и выполнялся тот же самый эксперимент, но при другой постоянной температуре. Диапазон изменения температуры составлял $20 \div 80^\circ\text{C}$. По аналогичной методике проведения экспериментов были выполнены исследования всех упомянутых выше гидромодулей. В результате проведенных гидродинамических исследований течения водно-зерновых суспензий на выше представленной экспериментальной установке были получены данные по изменению давления ΔP на исследуемом участке длиной 2 м при соответствующем расходе суспензии через трубу. По полученным данным с датчиков давления и расходомера для каждого отдельно взятого эксперимента рассчитывались средняя скорость движения суспензии $V_{\text{ср}}$ через поперечное сечение исследуемого участка прямолинейного трубопровода, критерий Рейнольдса суспензионного потока Re_c , коэффициент трения по длине λ , скорость сдвига $\dot{\gamma}$, а также параметры консистентных кривых P' и V' . Расчетные уравнения приведены в статье [6].

Результаты гидродинамических исследований и их обсуждение

Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рисунках 6 ÷ 11. Данные по коэффициентам трения λ были представлены на графиках в соответствии с зонами, полученными на графиках вязкостно-температурных кривых (рисунок 1). Это сделано для того, чтобы избежать наложения экспериментальных точек, полученных для различных температур и связанных со специфичным изменением коэффициентов динамической вязкости при их изменении. Графики зависимости λ от Re_c , соответствующие первой зоне вязкостно-температурной кривой, охватывают диапазон температур от 20 до 50°C , соответствующие второй зоне – диапазон температур от 60 до 80°C , включительно.

Для всех исследованных гидромодулей при постоянной температуре характерным является то, что с увеличением числа Рейнольдса значение коэффициента трения по длине уменьшается. При повышении температуры водно-зерновой суспензии от 20 до 50°C значения коэффициентов λ увеличивались при сопоставимых значениях Re_c (рисунок 6).

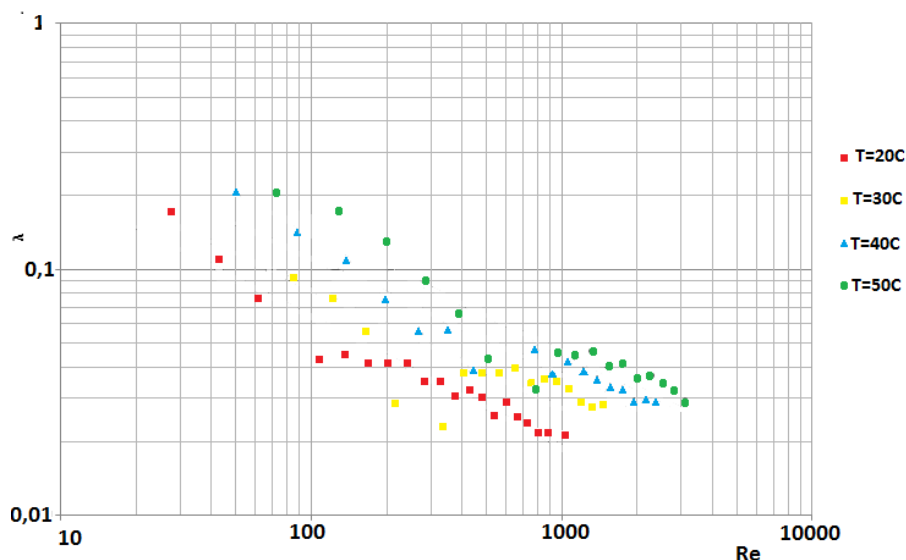


Рисунок 6 – Изменение коэффициента трения по длине λ от числа Рейнольдса Re в диапазоне температур $20 \div 50^\circ\text{C}$ (гидромодуль 1:4)

Однако, при дальнейшем увеличении температуры от 60 до 80°C значение коэффициента трения по длине уменьшается при сопоставимых значениях чисел Re_c . Такое поведение в изменении значений коэффициента трения λ объясняется влиянием вязкости водно-зерновой суспензии, связанной со структурно-механическими изменениями самой суспензии (рисунок 1).

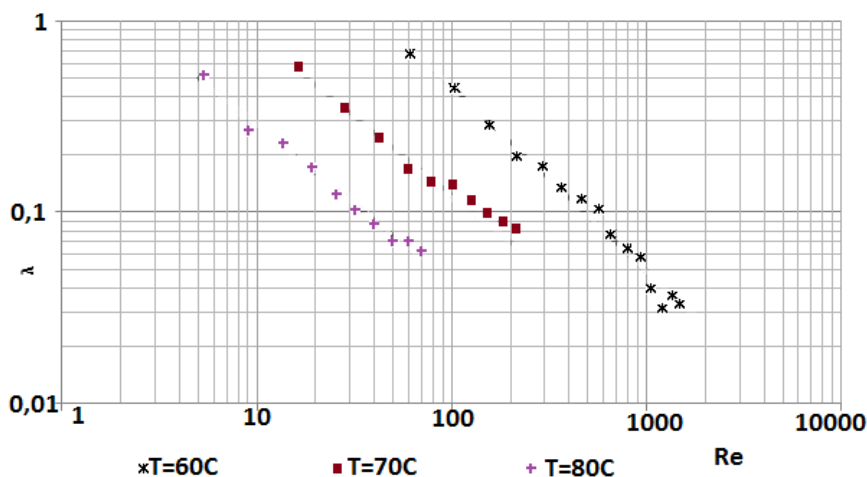


Рисунок 7 – Изменение коэффициента трения по длине λ от числа Рейнольдса Re в диапазоне температур $60 \div 80^\circ C$ (гидромодуль 1:4)

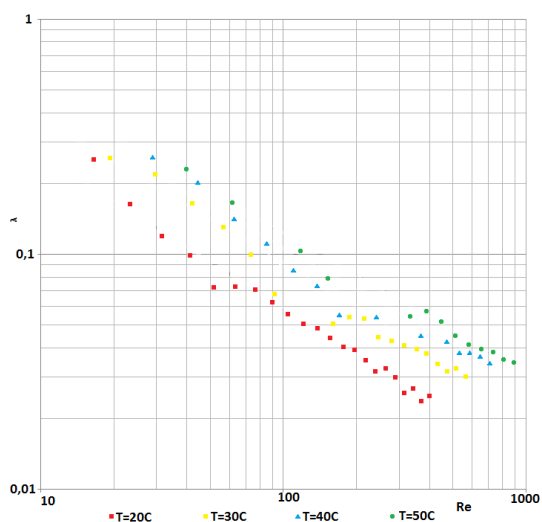


Рисунок 8 – Изменение коэффициента трения λ от Re в диапазоне температур $20 \div 50^\circ C$ (гидромодуль 1:3,5)

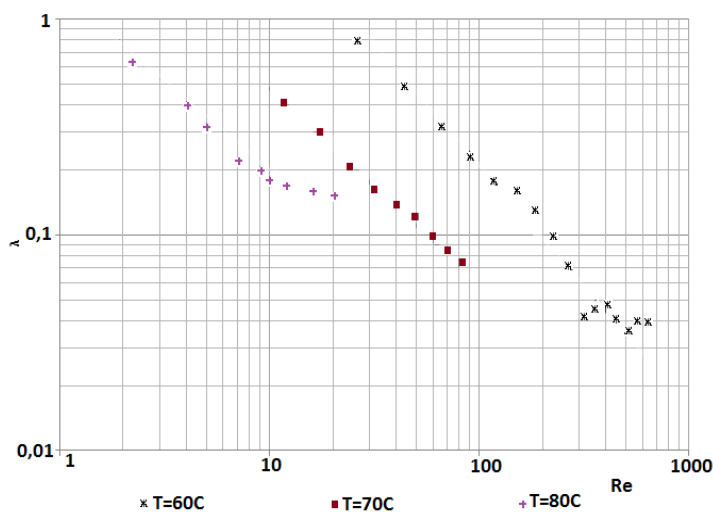


Рисунок 9 – Изменение коэффициента трения по длине λ от Re в диапазоне температур $60 \div 80^\circ C$ (гидромодуль 1:3,5)

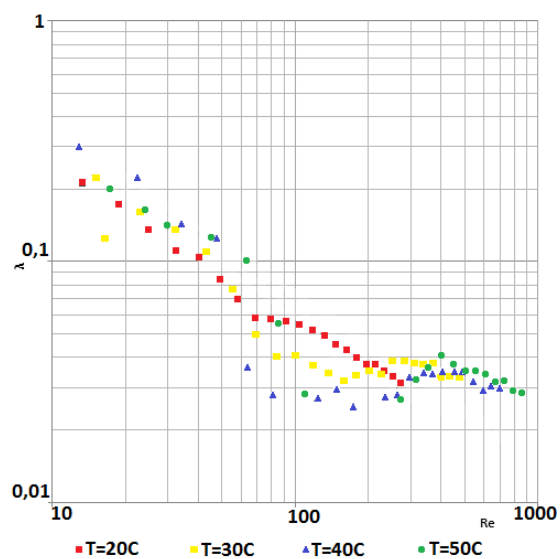


Рисунок 10 – Изменение коэффициента трения по длине λ от Re в диапазоне температур $20 \div 50^\circ C$ (гидромодуль 1:3)

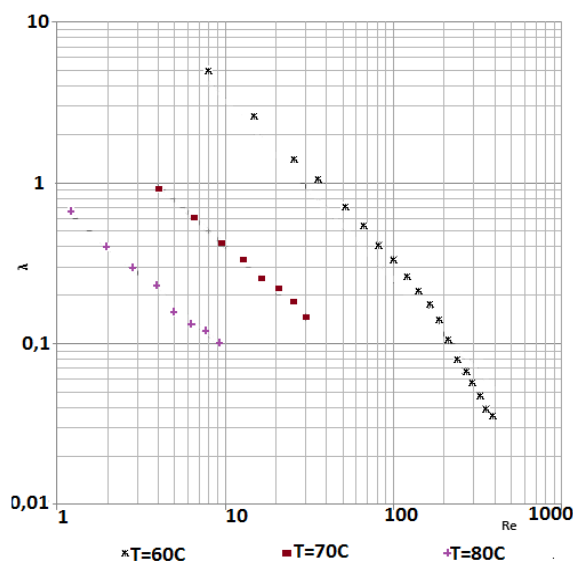


Рисунок 11 – Изменение коэффициента трения λ от Re в диапазоне температур $60 \div 80^\circ C$ (гидромодуль 1:3)

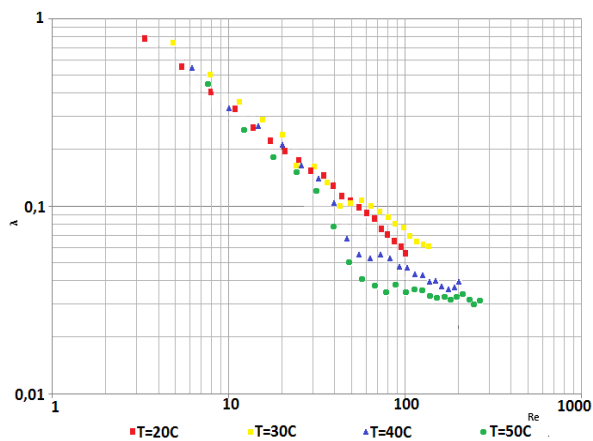


Рисунок 12 – Изменение коэффициента трения по длине λ от Re в диапазоне температур 20 ÷ 50°C (гидромодуль 1:2,5)

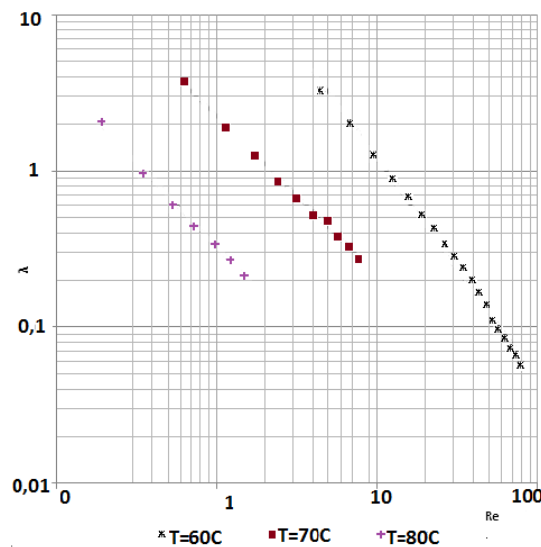


Рисунок 13 – Зависимость коэффициента трения λ от Re в диапазоне температур 60 ÷ 80°C (гидромодуль 1:2,5)

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить эмпирические уравнения для расчета коэффициента [10] λ , которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические уравнения для расчета коэффициента трения по длине λ

Тем-ра, °C	Гидромодуль			
	1:4	1:3,5	1:3	1:2,5
20	$\lambda = 0,7205 \cdot Re_c^{-0,526}$	$\lambda = 1,2001 \cdot Re^{-0,655}$	$\lambda = 1,5828 \cdot Re^{-0,716}$	$\lambda = 1,9713 \cdot Re^{-0,756}$
30	$\lambda = 0,7729 \cdot Re^{-0,484}$	$\lambda = 1,5823 \cdot Re^{-0,618}$	$\lambda = 1,653 \cdot Re^{-0,705}$	$\lambda = 2,1075 \cdot Re^{-0,741}$
40	$\lambda = 0,9651 \cdot Re^{-0,47}$	$\lambda = 1,5818 \cdot Re^{-0,585}$	$\lambda = 1,7183 \cdot Re^{-0,682}$	$\lambda = 1,6102 \cdot Re^{-0,739}$
50	$\lambda = 1,3732 \cdot Re^{-0,491}$	$\lambda = 1,8992 \cdot Re^{-0,594}$	$\lambda = 1,9121 \cdot Re^{-0,71}$	$\lambda = 2,1121 \cdot Re^{-0,856}$
60	$\lambda = 38,734 \cdot Re^{-0,967}$	$\lambda = 37,417 \cdot Re^{-1,124}$	$\lambda = 35,103 \cdot Re^{-1,12}$	$\lambda = 31,51 \cdot Re^{-1,414}$
70	$\lambda = 5,4946 \cdot Re^{-0,823}$	$\lambda = 3,8399 \cdot Re^{-0,907}$	$\lambda = 3,5973 \cdot Re^{-0,95}$	$\lambda = 2,2442 \cdot Re^{-1,016}$
80	$\lambda = 1,8609 \cdot Re^{-0,818}$	$\lambda = 1,3589 \cdot Re^{-0,834}$	$\lambda = 0,7586 \cdot Re^{-0,913}$	$\lambda = 0,3248 \cdot Re^{-1,091}$

По полученным данным гидродинамических исследований также были рассчитаны параметры P' и V' [5, 6, 11] и построены консистентные кривые, графики которых представлены на рисунках 14 ÷ 17.

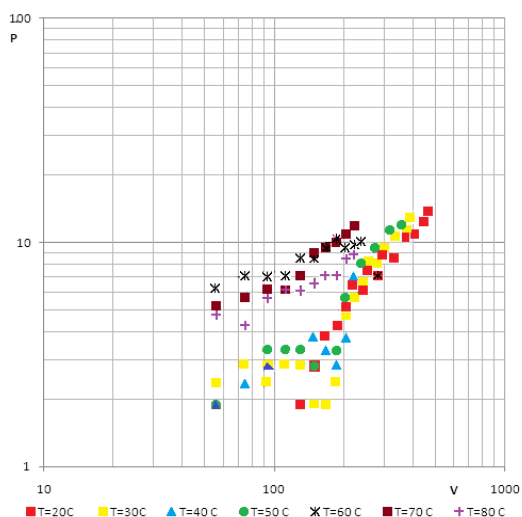


Рисунок 14 – Консистентные кривые водно-зерновой суспензии для гидромодуля 1:4

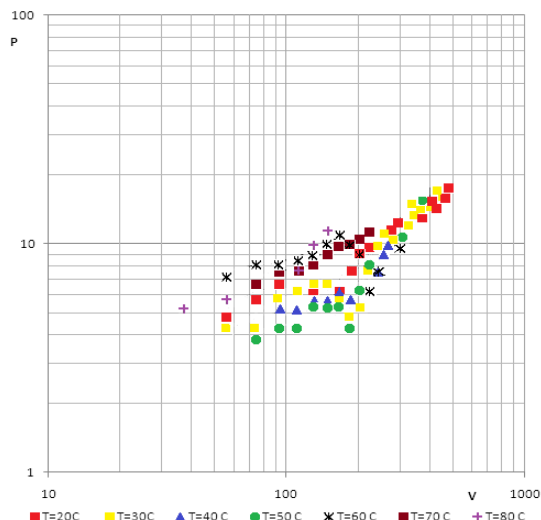


Рисунок 15 – Консистентные кривые водно-зерновой суспензии для гидромодуля 1:3,5

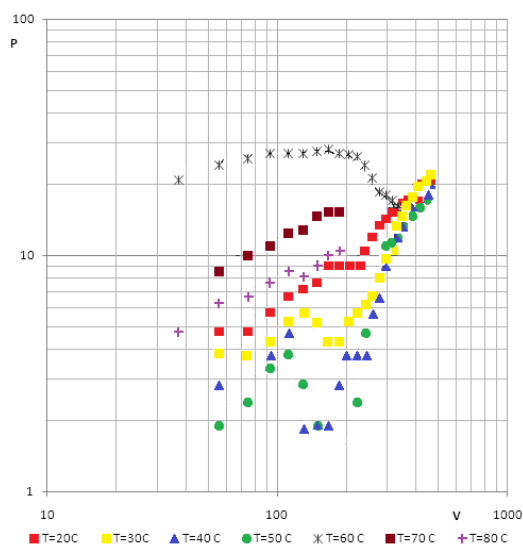


Рисунок 16 – Консистентные кривые водно-зерновой суспензии для гидромодуля 1:3

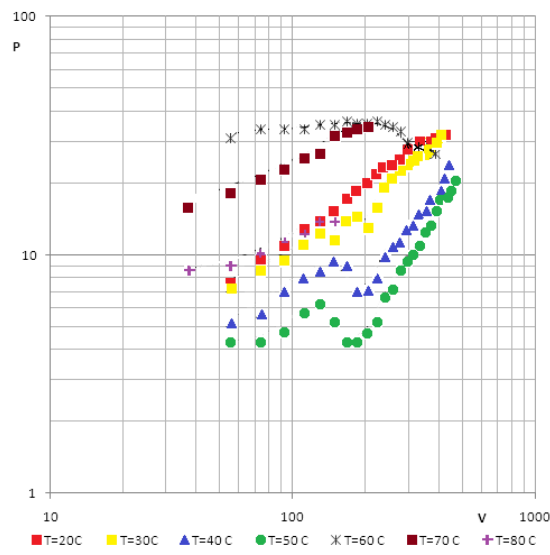


Рисунок 17 – Консистентные кривые водно-зерновой суспензии для гидромодуля 1:2.5

Из графиков, представленных на рисунках 14 ÷ 17 видно, что изменение значений касательных напряжений в зависимости от средней скорости потока суспензии, входящей в параметр V , носит сложный характер. Однозначно можно констатировать наличие трех характерных зон, которые прослеживаются на графиках для всех исследованных гидромодулей. Первая зона – зона повышения значений касательных напряжений при увеличении значений V примерно от $40 \div 55 \text{ с}^{-1}$ до $110 \div 200 \text{ с}^{-1}$ в зависимости от температуры суспензии. Вторая зона – зона снижения касательных напряжений при дальнейшем увеличении значений V от $110 \div 200 \text{ с}^{-1}$ до $180 \div 350 \text{ с}^{-1}$ и третья зона – зона вторичного увеличения значений касательных напряжений от 350 с^{-1} и выше. Другой особенностью полученных данных является то, что начало третьей зоны практически для всех исследованных температур происходит при одном и том же значении V . Тем не менее, для каждого гидромодуля начало третьей зоны отличаются друг от друга величиной V . Математическая обработка результатов расчетов значений параметров консистентных кривых, полученных при течении ячменных водно-зерновых суспензий, будут представлены в следующей статье.

Выводы

На основе проведенных реологических исследований водно-зерновых суспензий получены значения коэффициентов динамической вязкости для суспензий с гидромодулем 1:4; 1:3,5; 1:3 и 1:2,5 в широком диапазоне скоростей сдвига и температур.

Впервые представлены результаты численных значений коэффициентов трения по длине λ для водно-ячменных суспензий в широком диапазоне концентраций твердой фазы при различных температурах.

На основе полученных данных по исследованию гидродинамики течения водно-зерновых суспензий рассчитаны параметры консистентных кривых и представлены их графические зависимости в виде функций $P' = f(V')$.

Установлено, что зависимости $P' = f(V')$ для каждого отдельного гидромодуля носят сложный характер и зависят как от температуры, так и от скорости сдвига.

Полученные уравнения можно рекомендовать для определения численных значений коэффициентов динамической вязкости и коэффициента трения λ при проведении гидравлических расчетов технологических трубопроводов.

Литература

1. Арет В.А., Николаев Б.Л., Забровский Г.П., Николаев Л.К. Реологические расчеты оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 435 с.
2. Новоселов А.Г. Гидравлика. Гидродинамика (основные теоретические положения и кинематика). Ч. 2. СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. 109 с.
3. Валентас К., Ротштейн Э., Сингх Р. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов. СПб.: Профессия, 2004. 848 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1981. 560 с.
5. Шрамм Г. Основы реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
6. Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Чеботарь А.В., Малахов Ю.Л. Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Научное обоснование выбора метода исследований и разработка экспериментального стенда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2017. № 1(31). С. 42–51.
7. Деменюк С.Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при турбулентном течении в каналах. СПб.: Бюро hi Prom, 2010. 132 с.
8. Юрьев А.С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. СПб.: Мир и семья, 2006. 1154 с.
9. Тишин В.Б. Гидравлика. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 332 с.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.
11. Metzner A.B., Reed J.C. Flow of non-newtonian fluids. Correlation of the laminar, transition and turbulent-flow regions. *A.I.Ch.E.J.*, 1955, V.1, no.4, pp. 434–440.

References

1. Aret V.A., Nikolaev B.L., Zabrovskii G.P., Nikolaev L.K. *Reologicheskie rascheti oborudovaniya proizvodstva zhirusoderzhashchikh pishchevykh produktov* [Rheological calculations of equipment of the production of fatcontaining foods]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2006. 435 p.
2. Novoselov A.G. *Gidravlika. Gidrodinamika (osnovnye teoreticheskie polozheniya i kinematika)* [Hydraulics. Hydrodynamics (basic theoretical positions and kinematics)]. Part 2. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2011. 109 p.
3. Valentas K., Rotshtein E., Singkh R. *Pishchevaya inzheneriya* [Food engineering]. Handbook with examples of calculations. St. Petersburg, Professiya Publ., 2004. 848 p.
4. Pavlov K. F., Romankov P. G., Noskov A. A. *Primery i zadachi po kursu protsesov i apparatov himicheskoy tehnologii* [Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology]. Leningrad, Chemistry Publ., 1981, 560 p.
5. Shramm G. *Osnovy reologii i reometrii* [The fundamentals of rheology and rheometry]. Moscow, KolosS Publ., 2003, 312 p.
6. Novoselov A. G., Gulyeva Yu. N., Chebotar' A. V., Malakhov Y. L. *Reo- i gidrodinamika zernovykh suspenziy. Nauchnoe obosnovanie vybora metoda issledovaniy i razrabotka eksperemental'nogo stenda.* [Reo- and hydrodynamics of grain suspensions. Scientific substantiation of a choice of a method of researches and development of an experimental stand]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment.* 2017, no. 1, pp. 42–51.
7. Demenyuk S. L. *Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie pri turbulentnom techenii v kanalah* [Heat transfer and hydraulic resistance in turbulent flow in channels]. St. Petersburg, the Bureau hi Prom Publ., 2010, 132 p.
8. Yuriev A.S. *Spravochnik po rasetam gidravlicheskih i ventilyatsionnykh sistem* [Handbook for the calculation of hydraulic and ventilation systems]. St. Petersburg, Mir i Sem'ya Publ., 2006. 1154 p.
9. Tishin V. B. *Gidravlika* [Hydraulic]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ., 2006. 332 p.
10. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Manual hydraulic resistance]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960, 464 p.
11. Metzner A.B., Reed J.C. Flow of non-newtonian fluids. Correlation of the laminar, transition and turbulent-flow regions. *A.I.Ch.E.J.*, 1955, V.1, no.4, pp. 434–440.

Статья поступила в редакцию 15.05.2017