

УДК 637.143

Рео- и гидродинамика зерновых суспензий. Научное обоснование выбора метода исследований и разработка экспериментального стенда

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

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

Рассматривали решение задачи течения водно-зерновых суспензий по технологическим трубопроводам спиртовых и пивоваренных производств. Анализировали метод консистентных кривых течения, связывающих касательные напряжения на стенке трубопровода со средней скоростью движения. Теоретически показана взаимосвязь основного уравнения равномерного движения вязкой жидкости $\tau = \rho g i R$ и уравнения консистентной кривой $P' = K' V^n$. Описана специально созданная экспериментальная установка для проведения гидродинамических исследований течения водно-зерновых суспензий. Дана методика проведения испытаний и представлены их предварительные результаты. Получена графическая и математическая зависимости, описывающие характеристику сети трубопровода, устанавливающей связь между напором и расходом воды с учетом ее индивидуальных конструктивных особенностей. Впервые представлена зависимость характеристики сети трубопровода от температуры движущейся по ней жидкости. Определены численные значения коэффициента трения по длине λ . Дана графическая зависимость коэффициента трения по длине λ от числа Рейнольдса. Показано, что созданная установка пригодна для выполнения аналогичных исследований при изучении гидродинамики водно-зерновых суспензий.

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

DOI: 10.17586/2310-1164-2017-10-1-42-51

Rheo- and hydrodynamics of water-grain suspension. Scientific rationale of research method choice and pilot plant construction

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

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 pipelines of alcohol and brewing industries. Grease flow curve method which associates shear stress on the wall of the pipeline with the average flow speed is presented. Interrelation of the basic equation of uniform motion for viscous fluid $\tau = \rho g i R$ with grease curve equation $P' = K' V^n$ is shown. Detailed review of a pilot plant that was created for hydrodynamic investigation of water-grain suspension flow is provided. In order to determine working ability of pilot plant the preliminary test with water are conducted. The method of testing is given and preliminary testing results are provided. Mathematical and graphical relationships for the characteristics of pipeline network which determine correlation between water pressure and water flow taking into account its individual construction peculiarities are obtained. For the first time relationship between pipeline network characteristics and temperature of fluid flowing through the pipeline network is provided. The values of friction coefficient along the length of pipeline λ are

determined. Graphical relationship between friction coefficient along the length of pipeline λ and Reynolds number is shown. The pilot plant presented is shown to be of use in researches of water-grain suspension flow investigations along the similar lines.

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

Введение

Промышленное производство продуктов при непосредственном участии микроорганизмов получило масштабное распространение в спиртовой, пивоваренной, химико-фармацевтической, топливной и других отраслях производства. Модернизация процессов и аппаратов этих производств является важнейшей научно-технической задачей, которая связана с созданием новых современных производственных комплексов, оснащенных высокоэффективным технологическим оборудованием.

В процессе производства этанола на стадии водно-тепловой и ферментативной обработки зернового сырья (ВТФО) по низкотемпературным схемам нагрев и охлаждение смеси целесообразно проводить в теплообменных аппаратах, обладающих более высокими теплопередающими характеристиками, чем емкости с тепловой рубашкой. К ним относятся конструкции кожухотрубных теплообменников [1].

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

В процессе ВТФО водно-зерновая суспензия претерпевает значительные структурно-механические изменения, а именно перевод крахмала зерна из нативного (природного) состояния в водорастворимое. Такая трансформация крахмала обычно осуществляется под воздействием повышенных температур, амилолитических ферментов, а также при активном гидродинамическом воздействии жидкой фазы на зерновые частицы (гидродинамическая обработка).

Наличие твердых зерновых частиц в жидкой фазе не позволяет использовать классические уравнения для расчета гидравлических сопротивлений при движении однофазных ньютоновских сред в прямом виде. В этой связи представляет интерес 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. 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 ее расхода. Обычно при расчете трубопровода его схема и требуемый расход суспензии известны, поэтому необходимо определить напор, который нужно создать суспензии на входе в него. В этом случае большое влияние на гидравлические сопротивления оказывают физические свойства перекачиваемой суспензии, а именно ее вязкость и плотность.

Как правило, определение плотности суспензий не представляет большой проблемы и может быть рассчитано по правилу аддитивности с точностью, достаточной для инженерных расчетов [2, 3]. Определение значений коэффициентов динамической вязкости суспензий представляет более сложную задачу, особенно, если суспензии содержат значительное количество частиц и при движении в каналах с твердыми стенками проявляют неньютоновские свойства.

К настоящему времени общих теоретических решений задачи переноса количества движения в суспензионных потоках не существует [4–6].

Теоретическое обоснование метода построения консистентных кривых

Оценка силы сопротивления движению суспензии по каналам с твердыми стенками вытекает из понятия касательного напряжения τ , связанного с силой трения жидкости о твердую стенку $F_{тр}$ следующим соотношением

$$\tau = \frac{F_{тр}}{S},$$

где S – площадь поверхности трения, м².

Для ньютоновских изотермических жидкостей, имеющих постоянное значение коэффициента динамической вязкости независимо от скорости движения потока, величина τ описывается уравнением

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du_x}{dy}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$\frac{du_x}{dy}$ – изменение локальной скорости движения слоя жидкости в направлении основного

движения потока x при изменении расстояния между двумя соседними слоями dy в направлении перпендикулярном направлению x или скорость сдвига, с⁻¹.

Для упрощения записи уравнения (1) градиент локальной скорости обычно обозначают $\dot{\gamma}$, и оно принимает вид

$$\tau_{yx} = \mu \dot{\gamma}. \quad (2)$$

Уравнение (2) дает прямо пропорциональную зависимость между величиной касательных напряжений и скоростью сдвига для ньютоновских жидкостей. Для неньютоновских жидкостей, к которым относятся суспензии, такой зависимости не наблюдается.

Ранее [7–9] нами было установлено, что при постоянной температуре и составе водно-зерновой суспензии на основе ячменя они относятся к группе псевдопластичных жидкостей, т. е. значения коэффициента динамической вязкости уменьшаются с увеличением градиента скорости. Было показано, что в этом случае течение суспензии можно описать простой функциональной зависимостью степенного вида.

$$\tau_{yx} = K \dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

где K – показатель консистенции жидкости;

n – индекс течения при всех исследованных температурах водно-зерновой суспензии $n < 1$.

Значения K и n обычно определяются экспериментальным путем при помощи вискозиметров подходящей конструкции. Для измерения коэффициентов динамической вязкости водно-зерновых суспензий используют ротационные вискозиметры.

Другим путем оценки касательных напряжений при движении неньютоновских жидкостей является построение консистентных кривых течения, получивших широкое распространение в инженерной практике. Консистентная кривая представляет собой графическую зависимость потерь потенциальной энергии ΔP потока от его средней скорости $v_{ср}$. Связь между касательными напряжениями τ и ΔP можно установить из основного уравнения равномерного течения [10], согласно которому

$$\tau = \rho g i R, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$$i - \text{гидравлический уклон, } i = \frac{P_1 - P_2}{\rho g L} = \frac{\Delta P}{\rho g L} ;$$

$P_1; P_2$ – абсолютное давление в двух сечениях трубопровода, расположенных на расстоянии L друг от друга;

$$R - \text{гидравлический радиус, } R = \frac{D}{4}, \text{ м.}$$

Преобразуем уравнение (4), раскрыв значения i и R и выразив из них перепад давления ΔP на участке длиной L и геометрический диаметр трубопровода D . В результате получим

$$\tau = \rho g \frac{P_1 - P_2}{\rho g L} \frac{D}{4} = \frac{\Delta P \cdot D}{4L} = P' .$$

Средняя скорость потока может быть найдена из уравнения объемного расхода

$$v_{\text{cp}} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi r^2} = \frac{4Q}{\pi D^2} . \tag{5}$$

Для того, чтобы показать адекватность уравнения (2), в уравнении консистентной кривой должны совпадать размерности в левой и правой частях обоих уравнений. В работе [11] показано, что если течение жидкости равномерно и соответствует ламинарному режиму движения, а реологические характеристики жидкости не зависят от времени, то функциональная связь между P' и V не будет зависеть от диаметра трубы. Учитывая последнее замечание, рассмотрим правую часть уравнения (5) и разделим полученное уравнение на $D/2$, раскрыв значение Q . В результате получим значение параметра V следующем виде

$$V = \frac{4Q \cdot 2}{\pi D^2 \cdot D} = \frac{8 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot v_{\text{cp}}}{\pi \cdot D^2 \cdot D} = \frac{8 \cdot v_{\text{cp}}}{D} .$$

Графическая зависимость $P' = f(V)$ называется консистентной кривой течения.

Авторы работы [11] на основании многочисленных экспериментов показали, что уравнением (3) можно аппроксимировать связь величин P' и V степенной функциональной зависимостью

$$P' = K' V^{n'} , \tag{6}$$

которая по смыслу аналогична степенному реологическому уравнению (3).

В уравнении (6) K' – показатель консистенции, n' – показатель неньютоновского поведения и определяются экспериментально. Между реологическими и консистентными коэффициентами существуют теоретические соотношения [11]

$$n = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n' + 1} \cdot \frac{dn'}{d \ln P'}} ;$$

$$K' = K \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^n .$$

Уравнение консистентных кривых (6) более удобно для инженерных расчетов, чем степенное реологическое уравнение (3), т. к. это уравнение определяет непосредственно зависимость между перепадом давлений ΔP и расходом жидкости как функцию диаметра трубопровода, если известны консистентные характеристики исследуемой жидкости. Недостатком метода построения консистентных кривых течения является отсутствие получения данных по профилю скоростей, которые не могут быть использованы в уравнениях движения жидкости, а также необходимость создания специальной экспериментальной установки и наличие измерительных устройств.

Экспериментальная часть

Целью данной работы являлась разработка стенда для построения консистентных кривых при движении водно-зерновых суспензий в технологических трубопроводах и проверка его работоспособности на модельной среде (воде), для которой имеются обширные литературные данные. Все запланированные эксперименты были разбиты на две серии.

Первая серия исследований предполагала проверку работы измерительной аппаратуры в ходе экспериментов с однофазной средой. В качестве однофазной среды использовали водопроводную воду, т. к. именно для этой жидкости имеются многочисленные данные коэффициентов местных сопротивлений и сопротивлений трения [12]. Учитывая особенности данной установки, строили характеристику сети циркуляционной системы для последующего анализа на адекватность получаемых результатов.

Эксперименты выполнялись на специально созданной установке, схематическое изображение которой представлено на рисунке 1.

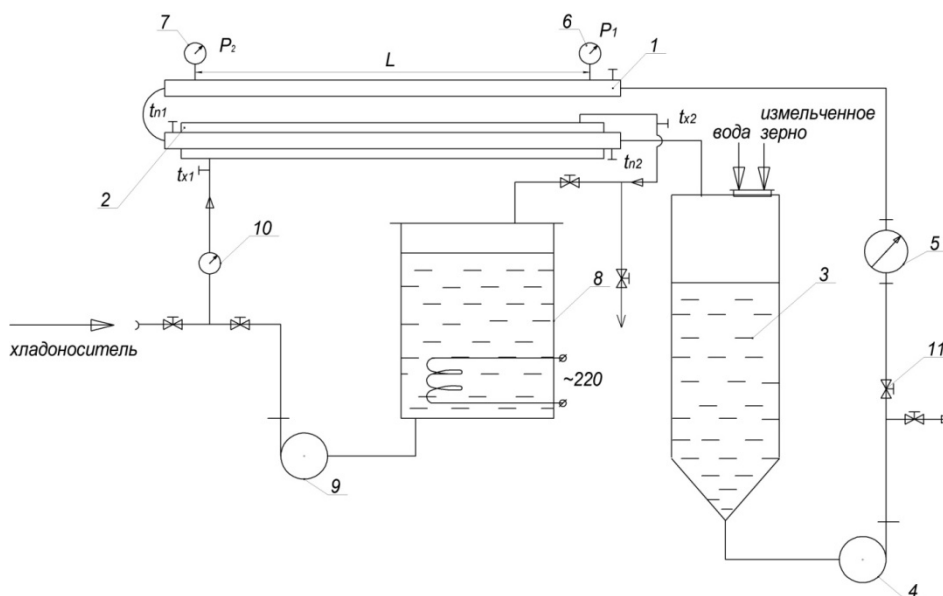


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для построения консистентных кривых течения водно-зерновой суспензии, приготовленной на основе ячменя

Экспериментальная установка состояла из испытательного участка трубопровода 1, теплообменника «труба в трубе» 2, сборной емкости 3, циркуляционного насоса 4, электромагнитного расходомера 5, датчиков давления 6 и 7, водонагревательного котла 8, питательного насоса 9, объемного счетчика 10, запорной и регулирующей арматуры 11.

Испытательный участок представлял собой установленную строго горизонтально трубу с внутренним диаметром $d_{тр} = 38$ мм и длиной 3 м. На расстоянии 0,64 м от местного сопротивления на входе жидкости в этот участок был установлен первый датчик давления 6 и точно через 2 м – второй датчик 7. Расстояние от места установки второго датчика давления до местного сопротивления на выходе жидкости из испытательного трубопровода составляло 0,36 м. Такое расположение датчиков давления было выбрано согласно рекомендациям работы [12].

При проведении гидродинамических испытаний установка работала следующим образом: вода заливается в емкость 1, включается насос 4 и вода начинает циркулировать через расходомер 5, исследуемый гидродинамический участок 1, теплообменник 2 и емкость 3. На этом этапе проверяется работа всех измерительных устройств, и снимаются показания датчиков давления для определения гидравлических потерь энергии на чистой воде.

Перед началом экспериментов емкость 3 заполнялась водопроводной водой, уровень жидкости в которой тщательно замерялся. Затем при помощи котла 8, питательного насоса 9 и теплообменника 2 устанавливалась заданная температура воды, поддерживаемая с помощью датчика температуры, и устанавливался ее необходимый расход через измерительный участок трубопровода. Измерение расхода осуществлялось электромагнитным расходомером Proline Promag 55. С этого момента в

постоянном режиме фиксируются объемный расход жидкости и показания датчиков давления 6 и 7, датчиков температуры $t_{п1}$ и $t_{п2}$, а также разница избыточных давлений ΔP при проведении гидродинамических исследований. Температура воды поддерживалась в пределах $20 \div 80 \pm 1^\circ\text{C}$.

После измерения вышеперечисленных параметров расход воды изменялся, и проводились новые измерения. Затем изменялась температура циркулирующей жидкости и проводились аналогичные измерения в том же диапазоне расходов воды, что и в предыдущем эксперименте. По окончании эксперимента полученные данные обрабатывались. Для этого вычислялись значения перепада давления на испытуемом участке ΔP , зафиксированные при помощи датчиков давления, Па

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

затем вычисляли значения средней скорости потока v , м/с

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d_{тр}^2}.$$

Далее рассчитывали значения критерия Рейнольдса по уравнению

$$Re = \frac{\rho v d_{тр}}{\mu}.$$

Значения ρ и μ для воды принимались в зависимости от температуры из справочной литературы [13].

Имея значения ΔP и v , рассчитывали значения коэффициента трения λ на исследуемом участке 1, используя уравнение Дарси–Вейсбаха

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \lambda \frac{L}{d_{тр}} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

откуда получили

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot d_{тр}}{v^2 \cdot \rho \cdot L}. \quad (7)$$

Затем значения λ , экспериментально полученные на исследуемом участке трубопровода, сравнивали с известными из литературы расчетными значениями $\lambda_{расч}$. При удовлетворительной сходимости значений λ и $\lambda_{расч}$ считали, что показания датчиков давления и расходомера являются достоверными, после чего строили характеристику трубопроводной системы экспериментальной установки.

Для этого были сняты все геометрические размеры трубопроводной системы экспериментальной установки, по которой движется нагреваемая вода. Схематично расчетная трубопроводная сеть представлена на рисунке 2.

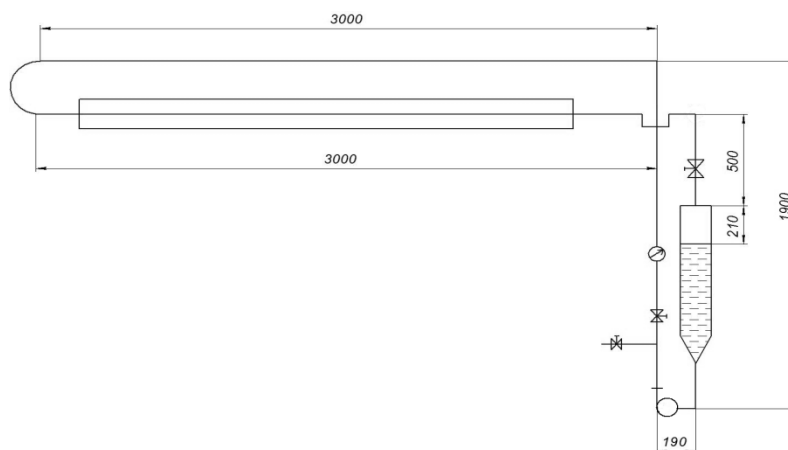


Рисунок 2 – Расчетная схема трубопроводной системы

Для проведения расчетов трубопроводная система была разбита на отдельные участки, состоящие из местных сопротивлений и сопротивлений по длине. Для построения характеристики данной системы использовали зависимость

$$H_c = H_r + K_s Q^2, \tag{8}$$

где H_r – геометрический напор, м;

K_s – коэффициент сопротивления трубопроводной системы, c^2/m^5 ;

Q – объемный расход воды, m^3/c .

Коэффициент сопротивления K_s рассчитывали по уравнению

$$K_s = \frac{8\xi_s}{\pi^2 d_{тр}^4 g}, \tag{9}$$

где ξ_s – коэффициент сопротивления трубопроводной системы, определяемый в соответствии со схемой по уравнению

$$\xi_s = \sum_n \lambda \frac{L}{d_{тр}} + \sum_m \xi_m. \tag{10}$$

где n – количество участков трубопровода, на которых определяются потери по длине;

m – количество участков трубопровода на которых определяются местные сопротивления.

Коэффициенты Дарси λ рассчитывались по уравнению (7), коэффициенты местных сопротивлений ξ_m выбирались по справочной литературе в зависимости от вида местного сопротивления и режима движения.

Результаты и их обсуждение

Графическая обработка значений λ в зависимости от критерия Рейнольдса показана на рисунке 3.

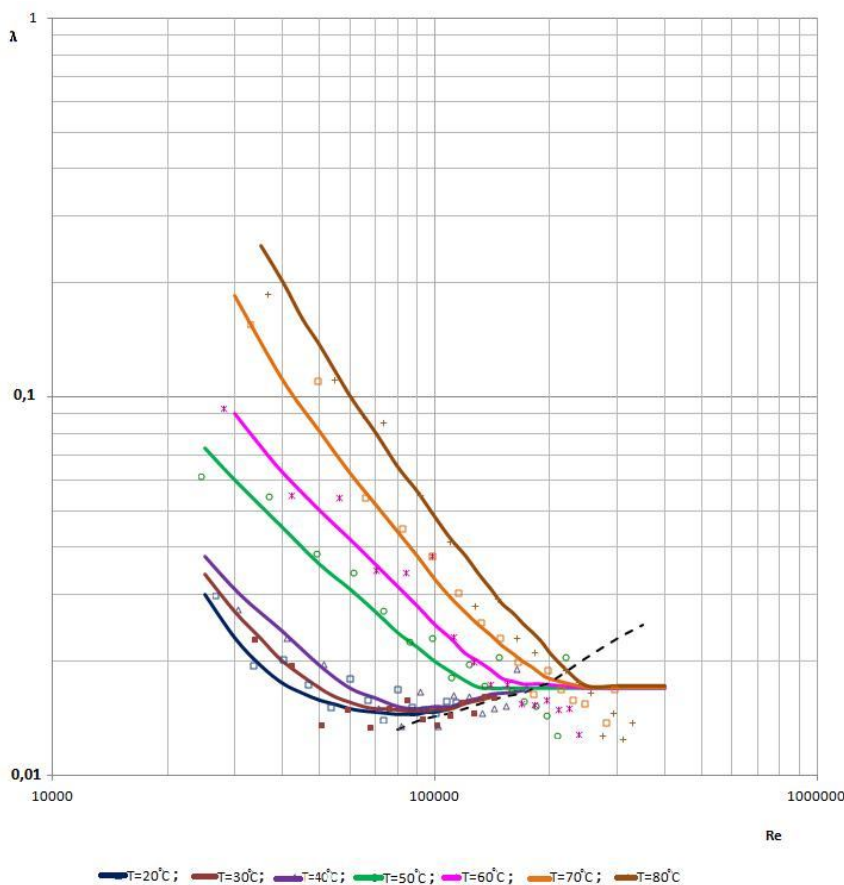


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента Дарси λ от числа Re для воды при различных температурах

Из графиков, представленных на рисунке 3, видно, что характер изменения λ в трубе постоянного диаметра точно воспроизводит поведение этой линии на графике Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) [12]. Здесь также наблюдается наличие двух характерных зон: первая характеризуется уменьшением значений λ с увеличением значений Re , вторая характеризуется постоянством значений λ с увеличением значений Re . Такое поведение функции $\lambda = f(Re)$ наблюдалось для всех исследованных значений температур. Принципиальным отличием каждой линии друг от друга являлась протяженность первой зоны. Из графика отчетливо видно, что переход зависимости $\lambda = f(Re)$ к автомодельной области, в которой $\lambda = const$, происходит при определенных (предельных) значениях $Re_{пр}$. Некоторую аналогию можно наблюдать и на графике ВТИ, но на нем величина $Re_{пр}$ является функцией относительной гладкости трубопровода. Такая же функция просматривается и на графике, представленном на рисунке 3. Только в нашем случае $Re_{пр}$ является функцией температуры T . Обработка значений функции $Re_{пр}$ от T позволила получить эмпирическое уравнение в виде

$$Re_{пр} = 4057T - 73192.$$

Значения коэффициентов трения λ в первой зоне в зависимости от температуры при различных Re можно рассчитать по уравнению следующего вида

$$\lambda = \frac{A}{Re^b}, \tag{11}$$

где A и b – коэффициенты, зависящие от температуры жидкости, значения которых приведены в таблице.

Таблица – Значения коэффициентов A и b уравнения (11)

№ п/п	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
A	1,149	1,65	155,16	186,1	1761	119761	298958
b	0,378	0,417	0,68	0,786	0,96	1,3	1,36

Используя полученные значения коэффициентов трения по длине λ и значения местных коэффициентов трения ξ_m по уравнениям (8 ÷ 10), были рассчитаны и построены зависимости напора от расхода воды при движении при различных ее температурах. Графическая зависимость напора сети от объемного расхода воды представлена на рисунке 4.

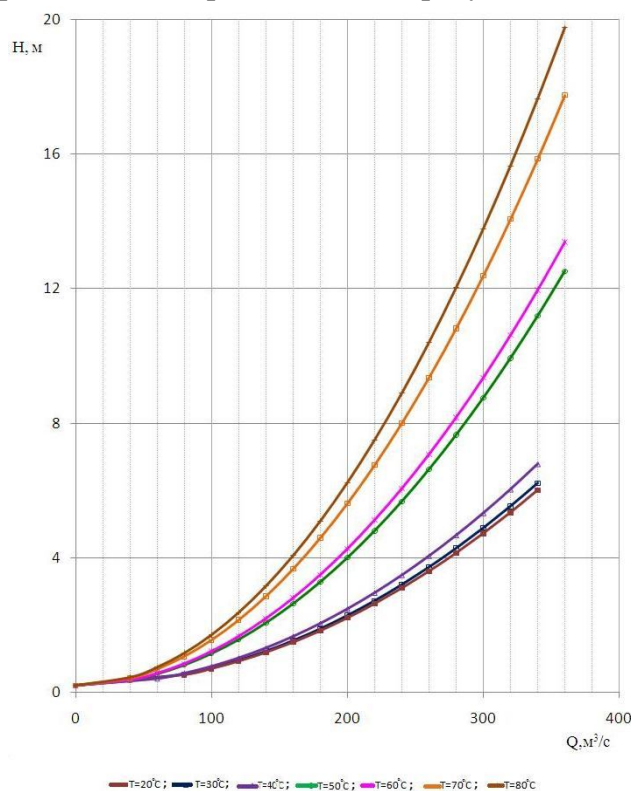


Рисунок 4 – Характеристика сети при различных температурах воды

Как видно из графиков, представленных на рисунке 4, с увеличением температуры характеристика сети трубопровода становится более крутой. Это кажется нелогичным, поскольку с увеличением температуры значения коэффициентов динамической вязкости понижаются. Однако с другой стороны, в условиях нагрева происходит разрушение пристенного ламинарного подслоя, вызванного в нем свободной конвекцией частиц жидкости. Это приводит к дополнительной турбулизации потока и как следствие, повышению гидравлических сопротивлений в трубопроводе.

Выводы

Разработана, создана и апробирована экспериментальная установка по исследованию гидродинамических параметров движения жидкостей в трубопроводах.

Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента трения по длине λ на модельной жидкости (воде) при различных температурах в диапазоне $20 \div 80^\circ\text{C}$.

Проведенные исследования показали достоверность получаемых данных с установленной на ней измерительной системы.

В дальнейшем данная экспериментальная установка будет использована для определения коэффициента трения по длине λ при течении водно-зерновых суспензий и построения консистентных кривых течения водно-зерновых суспензий с целью получения численных значений показателя консистенции жидкости – K и индекса течения – n для расчета гидравлических сопротивлений.

Литература

1. *Ибрагимов Т.С.* Совершенствование машинно-аппаратурной схемы производства этилового спирта: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 94 с.
2. *Юрьев А.С.* Справочник по расчету гидравлических и вентиляционных систем. СПб.: Мир и семья, 2006. 1154 с.
3. *Арет В.А., Николаев Б.Л., Забровский Г.П., Николаев Л.К.* Реологические расчеты оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 435 с.
4. *Валентас К., Ротштейн Э., Сингх Р.* Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов. СПб.: Профессия, 2004. 848 с.
5. *Косой В.Д., Виноградов Я.И., Мальшиев А.Д.* Инженерная реология биотехнологических сред. СПб.: ГИОРД, 2005. 648 с.
6. *Шрамм Г.* Основы реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
7. *Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Ибрагимов Т.С.* Характерные особенности изменения реологических свойств водно-зерновых суспензий в процессе водно-тепловой и ферментативной обработки (ВТФО) зернового сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 2.
8. *Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Свицков Д.В., Новоселов А.Г.* Реологические характеристики зерновых суспензий в процессе механико-ферментативной обработки // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 2.
9. *Новоселов А.Г., Малахов Ю.Л., Степаненко А.В., Гуляева Ю.Н.* Исследование реологических свойств водно-зерновых суспензий, приготовленных на основе измельченного солода // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2016. № 4. с. 83–90.
10. *Новоселов А.Г.* Гидравлика. Ч.2. Гидродинамика (основные теоретические положения и кинематика). СПб.: СПбГУНиПТ, 2011. 109 с.
11. Metzner A.V., 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.
12. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.
13. *Тишин В.Б.* Гидравлика: учебное пособие. СПб.: СПбГУНиПТ, 2006. 332 с.

References

1. Ibragimov T.S. Sovershenstvovanie mashinno-apparaturnoi skhemy proizvodstva etilovogo spirta [Improvement of machine-instrumental scheme of production of ethyl alcohol]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg., 2014. 94 p.
2. Yuriev A.S. *Spravochnik po raschetu gidravlicheskih i ventilyatsionnykh system* [Reference for calculation of hydraulic and ventilating systems]. St. Petersburg, Mir i sem'ya Publ., 2006. 1154 p.
3. Aret V.A., Nikolaev B.L., Zabrovskii G.P., Nikolaev L.K. *Reologicheskie raschety oborudovaniya proizvodstva zhirusoderzhashchikh pishchevykh produktov* [Rheological calculations of equipment of the production of fat-containing foods]. St. Petersburg, SPbGUNiPT Publ., 2006. 435p.
4. Valentas K., Rotshtein E., Singkh R. *Pishchevaya inzheneriya* [Food engineering]. Handbook with examples of calculations. St. Petersburg, Professiya Publ., 2004. 848 p.

5. Kosoi V.D., Vinogradov Ya.I., Malyshev A.D. *Inzhenernaya reologiya biotekhnologicheskikh sred* [Engineering rheology biotechnology environments]. St. Petersburg, GIOR Publ., 2005, 648 p.
6. Shramm G. *Osnovy reologii i reometrii* [The fundamentals of rheology and rheometry]. Moscow, KolosS Publ., 2003. 312 p.
7. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Ibragimov T.S. Kharakternye osobennosti izmeneniya reologicheskikh svoystv vodno-zernovykh suspenzii v protsesse vodno-teplovoy i fermentativnoi obrabotki (VTFO) zernovogo syr'ya. [Features change the rheological properties of aqueous suspensions of cereals in the water and heat and enzymatic treatment (HTPE) grain raw material]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2013, no. 2.
8. Ibragimov T.S., Chebotar' A.V., Svintsov D.V., Novoselov A.G. Reologicheskie kharakteristiki zernovykh suspenzii protsesse mekhaniko-fermentativnoi obrabotki [The rheological characteristics of cereal suspensions Mechanics during enzymatic treatment]. *Processes and Food Production Equipment*. 2012, no. 2.
9. Novoselov A.G., Malakhov Yu.L., Stepanenko A.V., Gulyaeva Yu.N. Issledovanie reologicheskikh svoystv vodno-zernovykh suspenzii, prigotovlennykh na osnove izmel'chennogo soloda [Rheological properties of water-grain suspensions on the basis of crushed malt]. *Scientific journal NRU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*. 2016, no. 4, pp. 83–90.
10. Novoselov A.G. *Gidravlika. Ch.2. Gidrodinamika (osnovnye teoreticheskie polozheniya i kinematika)* [Hydraulics. Part 2. Hydrodynamics (basic theoretical positions and kinematics)]. St. Petersburg, SPBGUNiPT Publ., 2011. 109 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.
12. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Manual hydraulic resistance]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960, 464 p.
13. Tishin V.B. *Gidravlika* [Hydraulics]. St. Petersburg, SPbGUNiPT Publ., 2006. 332 p.

Статья поступила в редакцию 15.02.2017