

УДК 637.143

## Экспериментальное исследование гидравлических сопротивлений при течении водно-зерновых суспензий в трубах

*Д-р техн. наук, проф.* **Новоселов А.Г.** dekrosh@mail.ru,

**Чеботарь А.В.** strategiay@mail.ru,

*канд. техн. наук* **Гуляева Ю.Н.** gulyaeva.yul@yandex.ru,

*Университет ИТМО*

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**Мераджи В.В.** oli192@mail.ru

*ООО «Балтпромарматура»*

*Ул. Магнитогорская дом 11*

*Рассмотрены методики получения расчетных зависимостей по изучению движения неньютоновских жидкостей в трубах и показаны два пути оценки величин гидравлических сопротивлений движению. Предложена последовательность применения результатов реодинамических исследований для инженерных расчетов трубопроводов. Предложена экспериментальная установка для проведения гидродинамических испытаний, позволяющая моделировать процесс водно-тепловой обработки измельченного зерна.*

*Получены результаты исследования гидравлических сопротивлений водно-зерновых суспензий при течении их по трубам. Представлены кривые зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса при движении водно-зерновой суспензии в исследуемом участке трубопровода для гидромодуля 1:4 при различных температурах. Представлены формулы расчета гидравлических сопротивлений для гидромодуля 1:4 при различных температурах.*

*Ключевые слова:* гидродинамика, водно-зерновая суспензия, гидравлические сопротивления.

---

## The experimental study the of hydraulic impedance occurring during flow of the water-grain suspense in pipelines

*D.Sc. prof.* **Novoselov A.G.** dekrosh@mail.ru, **Chebotar A.V.** strategiay@mail.ru,

*Ph. D.* **Gulyaeva Yu. N.** gulyaeva.yul@yandex.ru,

*University ITMO*

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Specialist, engineer* **Meradzhi V.V.** oli192@mail.ru

*LLC «Baltpromarmatura»*

*St. Magnitogorskaya 11*

*Present study reviews methods for calculating dependencies for the purposes of studying the flow of non-Newtonian liquids in pipelines and proposes two ways to evaluate hydraulic resistance of the flow.*

*Furthermore, we suggest a novel sequence for use of the rheodynamic data for engineering design of pipelines. Also, we propose hydrodynamic testing set-up to model water-thermal treatment of milled grain.*

*We present data obtained during the study of hydraulic impedance of the water-grain suspensions flow in pipelines. In particular, we show dependence between the friction coefficient and the Reynolds's number measured during flow of water-grains suspension through the studied section of a pipeline at hydro module value of 1:4 and at various temperature values.*

**Keywords:** hydrodynamics, water-grain suspension, hydraulic impedance.

Машинно-аппаратурная схема производства этанола на стадии водно-тепловой и ферментативной обработки зернового сырья (ВТФО) предполагает многократное его перемещение из одного аппарата или промежуточной емкости в другой технологический аппарат по трубам [1]. Ранее проведенные нами исследования по использованию кожухотрубных конструкций аппаратов для осуществления процесса ВТФО, дали положительные результаты [2-5] и так как перекачивание затора осуществляется насосами, правильный подбор которых неизбежно связан с расчетом гидравлических сопротивлений трубопроводов, возникающих при движении суспензии по ним, оценка гидравлических сопротивлений представляет собой актуальную задачу. Решение этой задачи востребовано необходимостью проведения инженерных расчетов при подборе технологического оборудования, работающего в проточном или циркуляционном режиме.

Основной задачей гидродинамики при течении неньютоновских жидкостей, также как и ньютоновских, является установление зависимости между средней скоростью течения и движущей силой, инициирующей это течение. На практике это выражается в получении инженерных уравнений связывающих потребный напор и объемный расход жидкости.

Анализ известных работ [6-10], посвященных изучению движения неньютоновских жидкостей в трубах показывает наличие аналогии в методике получения расчетных зависимостей.

В обоих случаях, и это подтверждено экспериментально, существуют ламинарный и турбулентный режимы течения. Их область существования также определяется понятием критерия Рейнольдса. В обоих случаях требуется оценка величины гидравлических сопротивлений движению, которые также разбивают на два вида – гидравлические сопротивления по длине и местные сопротивления. Принципиальным отличием является лишь количественные соотношения между параметрами величин, входящих в уравнения для расчета  $Re_n$ ,  $\lambda_n$  и  $\xi_n$  предложенные для описания течения неньютоновских жидкостей. В этом случае, актуальным становится определение границ существования областей ламинарного и турбулентного режимов течения, т.е. численная

оценка критического числа Рейнольдса характерного для данной псевдопластичной жидкости.

Решения вышеупомянутой гидродинамической задачи может вестись двумя путями. Первый путь это определение численных значений  $K$  и  $m$  из данных реодинамических лабораторных исследований неньютоновской жидкости на реотесте. Второй путь основан на построении консистентных кривых течения неньютоновской жидкости при ее движении непосредственно в трубопроводе. Преимущество второго пути очевидно, т.к. он позволяет воспроизводить все возможные режимы течения (ламинарный, переходный и турбулентный), которые могут возникнуть в трубопроводе. В случае выбора лабораторных реодинамических исследований необходимо помнить, что конструкции реотестов предполагают воспроизведение только ламинарного режима течения и результаты испытаний выдаются прибором исходя из зависимости Ньютона. Лабораторный путь менее затратен, т.к. не требует создания специального стенда для моделирования движения неньютоновской жидкости по трубам. Следовательно, и количество испытываемой жидкости, необходимое для исследований, минимально. Второй путь более затратен, т.к. предполагает создание специальной исследовательской установки, оснащенной оборудованием, позволяющим транспортировать неньютоновские жидкости, и измерительными приборами для контроля и измерения всех требуемых характеристик потока. Тем не менее, и первый и второй путь исследования гидродинамики неньютоновских жидкостей широко применяются в исследовательской практике.

Рассмотрим их более подробно, показав последовательность применения результатов реодинамических исследований для инженерных расчетов трубопроводов.

Если имеются данные, полученные в результате реодинамических исследований псевдопластичной жидкости на реотесте, то известны значения  $K$  и  $m$  в уравнении

$$\mu = \frac{K}{\dot{\gamma}^m} \quad (1)$$

Критерий Рейнольдса может быть рассчитан по уравнению, приведенному в работе [9]

$$\text{Re}_n = \left( \frac{w^{2-m} \cdot d_{mp}^m \cdot \rho}{8^{m-1} \cdot K} \right) \cdot \left( \frac{4m}{3m+1} \right)^m \quad (2)$$

где  $K$  - коэффициент консистенции,  $\text{Па} \cdot \text{с}^{-m}$ ,

$m$  – индекс течения,

$w$  – средняя скорость потока неньютоновской жидкости,  $\text{м/с}$ ;

$d_{mp}$  – внутренний диаметр трубопровода, м.

Значения  $m$  и  $K$  берутся по данным реодинамических исследований на ротационном вискозиметре.

Значение средней скорости потока  $w$  определяется из уравнения неразрывности потока несжимаемой жидкости, если задан объемный расход  $Q$

$$w = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d_{mp}^2}$$

Режим движения оценивается путем сравнения значений чисел Рейнольдса – расчетного (уравнение 2) и критического  $Re_{кр.н}$ .

Критическое число Рейнольдса для неньютоновских сред предложено рассчитывать по уравнению

$$Re_{кр.н} = \frac{6464m}{(1+3m)^2 (1/(2+m))^{(2+m)/(1+m)}} \quad (3)$$

При  $Re_n < Re_{кр.н}$  течение будет происходить в ламинарном режиме, при  $Re_n > Re_{кр.н}$  будет турбулентным.

Средняя скорость потока степенной жидкости  $w$  может быть определена по уравнению [9]

$$w = \frac{Q}{\pi R^2} \left[ \pi \left( \frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{m}{3m+1} \right) \cdot R^{\frac{(3m+1)}{m}} \right] \left( \frac{1}{\pi R^2} \right) \quad (4)$$

где  $Q$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$R$  – внутренний радиус трубопровода, м;

$L$  – длина трубопровода, м.

Потери полной энергии на прямолинейном участке трубопровода (потери энергии по длине) можно рассчитать по следующей зависимости

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{4w^m K}{d_{mp}^{1+m}} \left( \frac{2+6m}{m} \right)^m \quad (5)$$

Использование в вышеприведенных уравнениях значений  $K$  и  $m$ , полученных из реодинамических исследований на ротационных вискозиметрах, справедливо для ламинарного режима движения псевдопластичных жидкостей. Здесь следует помнить,

что расчетные зависимости, положенные в основу измерений на всех конструкциях визкозиметров, получены из рассмотрения слоевого (ламинарного) течения. Поэтому, в случае наличия в трубопроводе турбулентного режима движения, применение уравнений 4 и 5 требует экспериментальной проверки и введения эмпирических коэффициентов, отражающих характерные особенности поведения частиц неньютоновской жидкости в турбулентном потоке.

В работах [10] предложено, при проведении инженерных расчетов трубопроводов, используемых для транспортировки неньютоновских жидкостей (псевдопластичных и дилатантных), а также при обобщении реодинамических данных применять консистентные кривые течения следующего вида

$$P = K' \cdot V^{m'} \quad (6)$$

где  $P$  и  $V$  – обобщенные консистентные переменные в уравнении (6).

Переменная  $P$ , собственно, представляет собой касательные напряжения на стенке  $\tau_{CT}$  трубопровода и ее расчет вытекает из уравнения равномерного движения известного из классической гидродинамики ньютоновских жидкостей [10]

$$\tau_{CT} = \rho g i R \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$i$  - гидравлический уклон;  $R$  – гидравлический радиус, м.

Преобразуем уравнение (7), выразив  $i$  и  $R$ , соответственно, через перепад давления  $\Delta P$  на прямолинейном участке трубопровода длиной  $L$  и диаметр трубопровода  $d_{mp}$ , а именно

$$i = \frac{h_{0л}}{L} = \frac{\Delta P}{\rho g L} \quad \text{и} \quad R = \frac{d_{mp}}{4}$$

и, подставив эти выражения в (10) получим

$$\tau_{CT} = \frac{d_{mp} \cdot \Delta P}{4L_{mp}} \quad (8)$$

Значение консистентной переменной  $V$ , с объемным расходом  $Q$ , а, следовательно, и со средней скоростью потока  $w$

$$V = \frac{32Q}{\pi \cdot d_{mp}^3}, \quad (9)$$

В уравнении (6): размерность консистентной переменной  $P$  – Н/м<sup>2</sup> (Паскаль), размерность консистентной переменной  $V$  – с<sup>-1</sup>, т.е. просматривается полная аналогия между уравнениями (1) и (6).

Связь между параметрами  $K$  и  $K'$ , а также  $m$  и  $m'$  определяется уравнениями

$$m = \frac{m'}{1 - \frac{1}{3m'+1} \cdot \frac{dm'}{d \ln p}} \quad (10)$$

$$K' = K \left( \frac{3m+1}{4m} \right)^m \quad (11)$$

Если  $m'$  постоянно во времени, то

$$m = m'$$

Если  $m$  переменная величина, то

$$K' = K \left( \frac{3m'+1}{4m} \right) \cdot V^{m-m'} \quad (12)$$

В работе [10], предложено оценивать значения  $Re_{кр.н.}$  в случае движения псевдопластичных жидкостей, по уравнению

$$Re_{кр.н.} = \frac{d_{mp}^{m'} \cdot w^{2-m'} \cdot \rho}{K' \cdot 8^{m'-1}} \quad (13)$$

где  $m' = \frac{d \ln P}{d \ln V}$

$w$  – средняя скорость потока неньютоновской жидкости – м/с;

$K'$  - константа консистенции в уравнении консистентного течения (6)

Таким образом, определив, экспериментально, вид зависимости (6) можно выполнить расчет  $\Delta P$ . Для решения этой задачи нами была создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.1.

При проведении гидродинамических испытаний установка работает следующим образом.

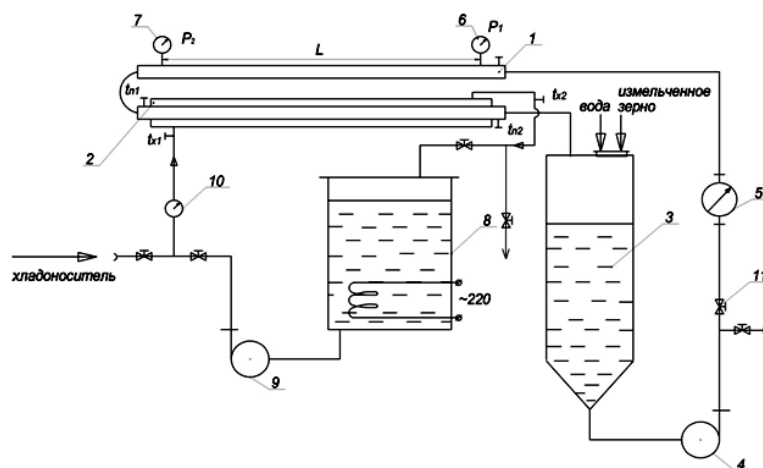


Рис.1. Схема экспериментальной установки для изучения режимов течения водно-зерновой смеси в трубах

- 1 – горизонтальная труба (исследуемый участок); 2 – теплообменник «труба в трубе»; 3 – цилиндрикоконическая емкость, 4 - циркуляционный насос, 5 – электромагнитный расходомер, 6,7 – датчики давления, 8 – котел, 9 – насос подачи теплоносителя, 10 – объемный счетчик тепло- или хладоносителя,  $t_{n1}$ ,  $t_{n2}$ ,  $t_{x1}$ ,  $t_{x2}$  - датчики температуры

В емкости 1 создается суспензия требуемой концентрации (в спиртовой промышленности применяется термин гидромодуль, т.е. соотношение твердой фазы, измельченного зерна, и воды). Для этого, тщательно отмеренное количество воды, заливается в емкость 1. Затем запускается 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. После этого начинается подача измельченного зернового материала в требуемом количестве. С этого момента в постоянном режиме фиксируются: объемный расход жидкости и показания датчиков давления 6 и 7, также датчиков температуры  $t_{n1}$  и  $t_{n2}$ . По окончании загрузки твердой фазы проводится изменение объемного расхода суспензии и фиксирование разницы избыточных давлений  $\Delta P = P_1 - P_2$ . При проведении гидродинамических исследований температура суспензии поддерживалась в пределах  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Данная экспериментальная установка позволяет моделировать процесс водно-тепловой обработки измельченного зерна. В этом случае эксперимент проводится следующим образом.

Система теплоснабжения, состоящая из котла 8, циркуляционного насоса 9, теплообменника 2 и коммуникационных трубопроводов, заполняется водой и прогревается до требуемой температуры. Затем, емкость 3 заполняется до расчетного объема водой, и включается циркуляционный насос 4 для ее нагрева до заданной температуры. После этого в емкость 3 вносится необходимое количество измельченного зерна для создания требуемого гидромодуля и, с этого момента, начинается фиксация показаний датчиков температуры, давления и показания расходомеров 5 и 10.

С момента внесения зернового материала в воду начинается необратимый процесс трансформации твердой фазы, связанный, на начальной стадии, с частичным растворением углеводов содержащихся в зерне, а, при повышении температуры суспензии до  $50\div 60^{\circ}\text{C}$  с клейстеризацией нативного крахмала. Установка позволяет осуществлять нагрев водно-зерновой суспензии до  $80^{\circ}\text{C}$  и одновременно фиксировать изменение величины гидравлических сопротивлений, связанных с изменением ее структурно-механических свойств. Кроме того, в процессе проведения экспериментов имелась возможность оценивать скорость нагрева водно-зерновой суспензии, и ее влияние на скорость конверсии нативного крахмала в водорастворимые углеводы. Более того, данная установка позволяет осуществлять отбор проб в течение всего эксперимента для оперативного измерения вязкости исследуемой жидкости на реотесте, с целью проверки соответствия соотношений 6 и 7 для изучаемой среды.

После проведения первой серии экспериментов были выполнены исследования по гидродинамике движения водно-зерновой суспензии с гидромодулем 1:4.

Далее (рис. 2, 3) представлены кривые зависимости коэффициента трения  $\lambda_n$  от изменения числа Рейнольдса  $Re_n$ .



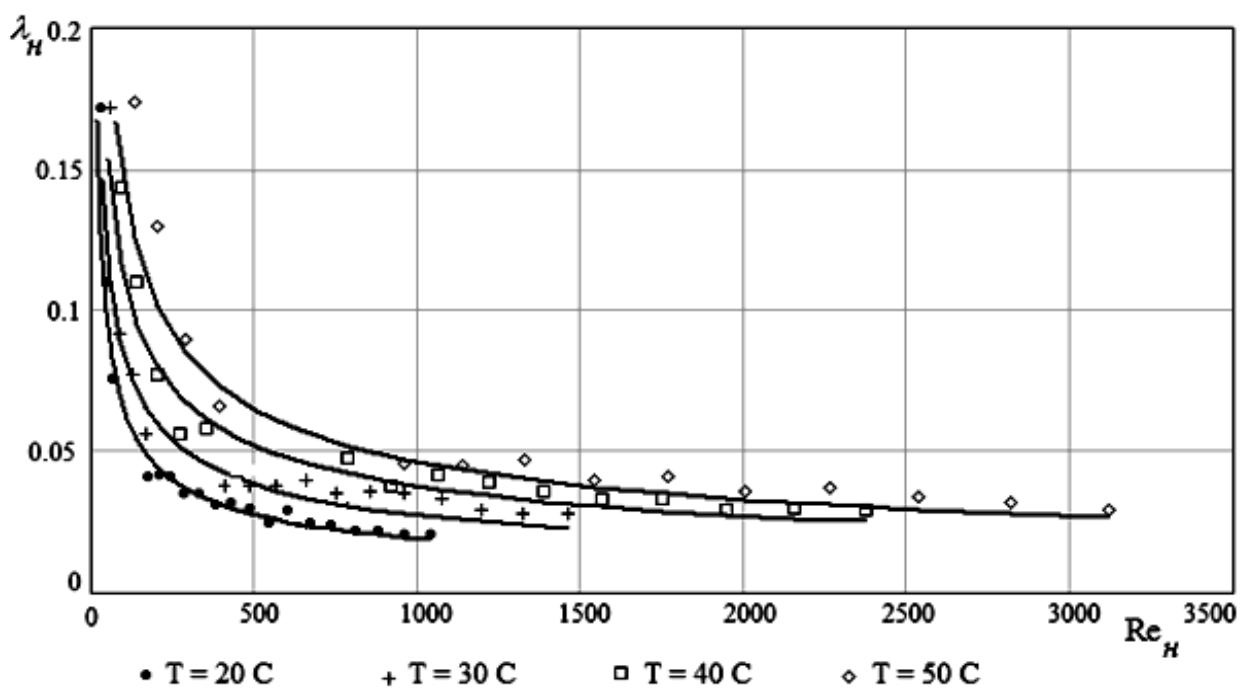


Рис. 2. График зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса при движении водно-зерновой суспензии в исследуемом участке трубопровода длиной 2 м при температурах 20-50°C и гидромодуле 1:4

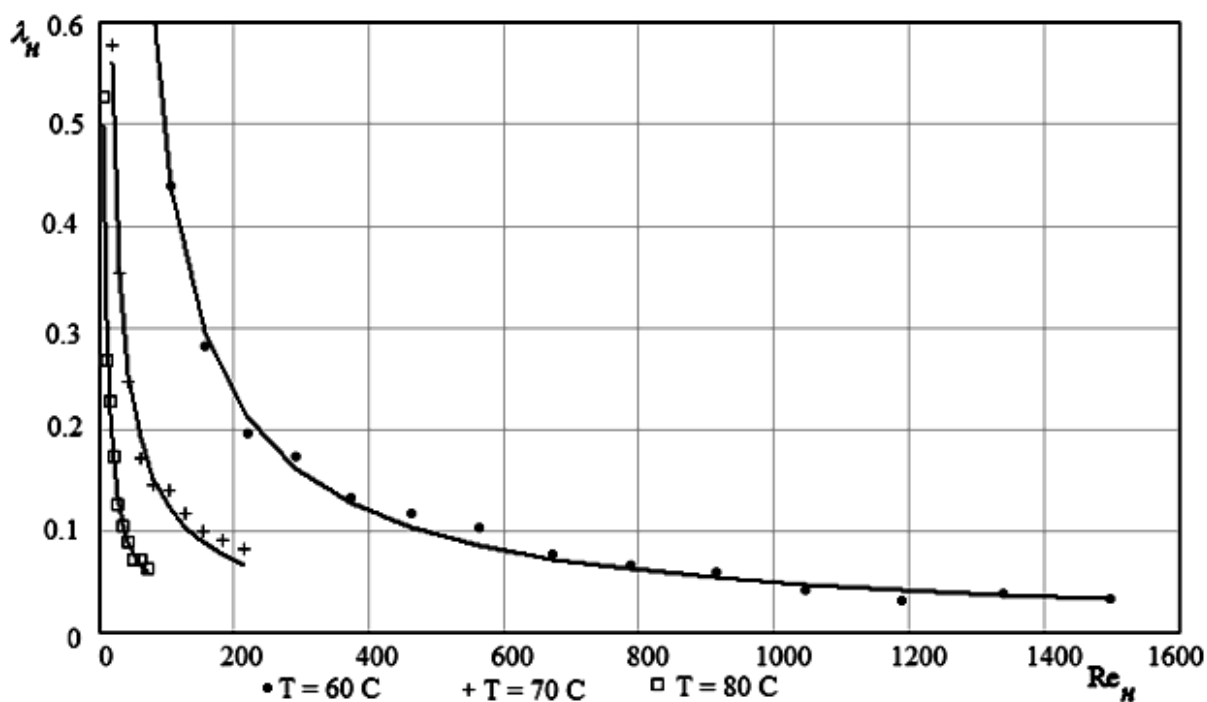


Рис. 2. График зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса при движении водно-зерновой суспензии в исследуемом участке трубопровода длиной 2 м при температурах 60-80 °C и гидромодуле 1:4

В результате обработки эмпирических данных были получены уравнения (табл. 1), описывающие изменение коэффициента трения  $\lambda_n$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re_n$  для заданного гидромодуля.

Таблица 1

Сводная таблица формул для расчета  $\lambda_n$  при различных температурах

Температура	Гидромодуль 1:4
20	$\lambda_n = 0,72 \cdot Re_n^{-0,53}$
30	$\lambda_n = 0,77 \cdot Re_n^{-0,48}$
40	$\lambda_n = 0,97 \cdot Re_n^{-0,47}$
50	$\lambda_n = 1,37 \cdot Re_n^{-0,49}$
60	$\lambda_n = 38,7 \cdot Re_n^{-0,97}$
70	$\lambda_n = 5,49 \cdot Re_n^{-0,82}$
80	$\lambda_n = 1,86 \cdot Re_n^{-0,82}$

где коэффициенты при числе Рейнольдса являются функцией температуры суспензии.

Из уравнений в таблице 1 можно констатировать закономерность поведения водно-зерновых суспензий, а именно внутри исследуемого гидромодуля: постепенное повышение коэффициента трения до температуры начала клейстеризации крахмала около 60°C, в следствии трансформации водно-зерновой суспензии, затем при температуре около 60-80°C резкое его снижение вследствие существенного повышения вязкости замеса на стадии клейстеризации крахмала, и достижения наименьшего показателя при температуре 80°C, когда наблюдается максимальная вязкость замеса, о чем свидетельствуют коэффициенты при числе Рейнольдса. Такое поведение замесов подтверждают и данные реодинамических исследований.

Полученные эмпирические уравнения можно использовать для расчета циркуляционных трубопроводов и подбора насосов для обвязки технологических аппаратов, применяемых в спиртовой промышленности.

### Список литературы

1. Яровенко В.Л. Технология спирта. – М.: Колос, 2002. – 465с.
2. Новоселов А.Г., Ибрагимов Т.С. Баракова Н.В., Чеботарь А.В. Повышение эффективности производства спирта за счет проведения нескольких технологических стадий в одном аппарате. 2. Проведение механико-ферментативной обработки зернового сырья в КСИБА. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. №1.

3. 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. №1.

4. Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Новоселов А.Г. Проведение водно-тепловой обработки, осахаривания и сбразивания высококонцентри-рованного суслу в КСИБА с применением низкотемпературной схемы разваривания // Новые Технологии, - Майкоп: Майкопский государственный технологический университет (МГТУ), 2011. Вып. №4. С. 24-27. 322с.

5. Ибрагимов Т.С., Чеботарь А.В., Новоселов А.Г. Производство этилового спирта в кожухотрубном струйно-инжекционном аппарате по низкотемпературной схеме // Техника и технология пищевых производств. - Кемерово: КемТИПП, 2012. - Вып. №1 (24). С. 112-115. 168 с.

6. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен. – М.: Мир, 1964. – 216с.

7. Мидлманн С. Течение полимеров. – М.: Мир, 1971. – 260 с.

8. Рафиков С.Р., Будтов В.П., Монаков Ю.Б. Введение в физикохимию растворов полимеров. М.: Наука, 1978, - 328с.

9. Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П.(ред.) /пер. с англ. Под общ.ред. А.Л. Ишевского. – СПб: Профессия, 2004. – 848 с., ил., табл., сх. – (Серия: Справочник).

10. 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, №4, p.434-440.

### References

1. Jarovenko V.L. Technology of alcohol. – М.: Kolos, 2002. – 465p.

2. Novoselov A.G., Ibragimov T.S. Barakova N.V., Chebotar' A.V. Increase of production efficiency of alcohol due to carrying out several technological stages in one device. 2 . Carrying out mekhaniko-fermentativny processing of grain raw materials in KSIBA. // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2011. №1.

3. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Ibragimov T.S. Characteristics of change of rheological properties of water and grain suspensions in the course of water and thermal and fermentativny processing (VTFO) of grain raw materials // *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Processy i apparaty pishhevyh proizvodstv»*. 2013. №1.

4. Ibragimov T.S., Chebotar' A.V., Novoselov A.G. Carrying out water thermal treatment, osakharivaniye and sbrazhivaniye of a vysokokontsentr-rovanny mash in KSIBA

with application of the low-temperature scheme of a razvarivaniye // *Novye Tehnologii*, - Majkop: Majkopskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet (MGTU), 2011. Vyp. №4. p. 24-27. 322s.

5. Ibragimov T.S., Chebotar' A.V., Novoselov A.G. Production of ethyl alcohol in the kozhukhotrubny jet and injection device according to the low-temperature scheme // *Tehnika i tehnologija pishhevyyh proizvodstv*. – Kemerovo: KemTIPP, 2012. №1 (24). p. 112-115. 168 p.

6. Uilkinson U.L. Non-Newtonian liquids. Hydromechanics, hashing and heat exchange. – M.: Mir, 1964. – 216p.

7. Midlmann S. Current of polymers. – M.: Mir, 1971. – 260 p.

8. Rafikov S.R., Budtov V.P., Monakov Ju.B. Introduction in a fizikokhimiya of solutions of polymers. M.: Nauka, 1978, 328p.

9. Valentas K.Dzh., Rotshtejn Je., Singh R.P. Food engineering: the reference book with examples of calculations / Valentas K.Dzh., Rotshtejn Je., Singh R.P.(red.) /per. s angl. Pod obshh.red. A.L. Ishevskogo. – SPb: Professija, 2004. – 848 p. il. tabl. sh. – (Serija: Sparavochnik).

10. 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, №4, p.434-440.