

УДК 637.143

**Системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала в технологии производства пищевого этанола.  
Часть 2. Анализ блоков «Энергия» и «Аппарат»**

*Д-р техн. наук* Новоселов А.Г., Гуляева Ю.Н., Сивенков А.В.

dekrosh@mail.ru

ITMO University

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

*В статье продолжено рассмотрение системного подхода к анализу процессов водно-тепловой и ферментативной обработки зерновой суспензии. Подробно рассмотрена структура двух следующих блоков – «Энергия» и «Аппарат». Схематично показана взаимосвязь блока «Энергия» с блоками «Среда» и «Аппарат». Применительно к процессу водно-тепловой и ферментативной обработки зерна показано влияние гидродинамики и реодинамики на скорость трансформации нативного крахмала в простые углеводы.*

**Ключевые слова:** системный анализ, водно-зерновая суспензия, водно-тепловая обработка.

---

**The system approach to analysis of water-heat and enzyme treatment of grain substance in production of food grade ethanol.  
Part 2. Analysis of the bloc "Energy" and "Device"**

*D. Sc.* Novoselov A.G., Gulyaeva Yu.N., Sivenkov A.V.

dekrosh@mail.ru

ITMO University

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

*In the article we continue the systematic approach to the analysis of water-heat and enzyme treatment of the grain suspension. There are checked in details the two blocs: "Energy" and "Device". Schematically shows the relationship of the bloc "Device" with the blocs "Energy" and "Medium". For the process of water – heat and enzymatic treatment of grain, it shows the impact of hydrodynamic and rheodynamic on transformation rate of the native starch into simple carbohydrates.*

**Keywords:** system analysis, water-grain suspension, water -heat treatment.

---

В предыдущей статье [1] нами был подробно рассмотрен подсистемный блок «СРЕДА», с которого начинается системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала (ВТФО ЗС) в технологии производства пищевого этанола.

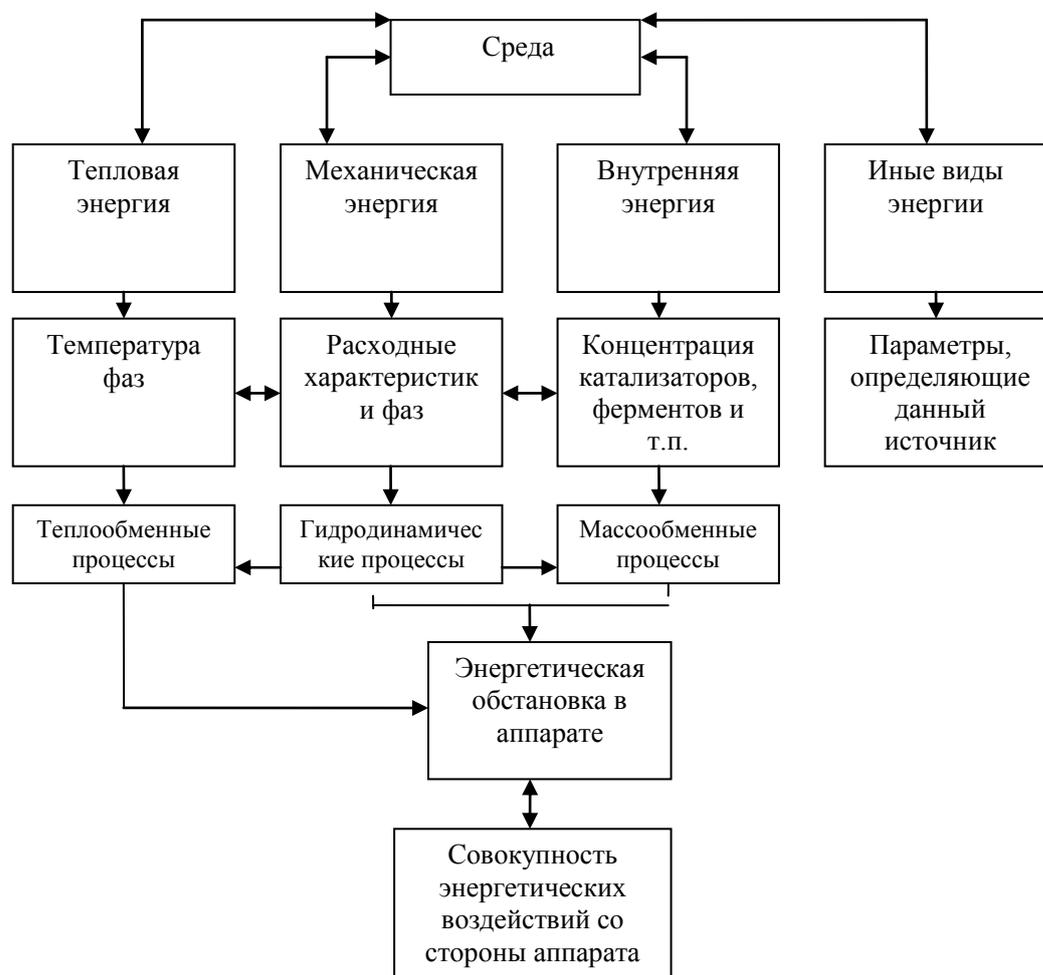
Как было показано в [1], при проведении ВТФО ЗС происходит, одновременно, целый ряд физико-химических процессов, определяющих последовательную трансформацию среды в нужном направлении. Скорость их проведения будет, в конечном счете, определять скорость проведения всего процесса ВТФО. В свою очередь скорость физико-химических процессов зависит от вида, подводимой к обрабатываемой среде, энергии и интенсивности ее подвода. Основной задачей, которая решается при подводе энергии к рабочей среде является задача перемещения среды от точки входа ее в аппарат к точке выхода (если аппарат проточного типа) и поддержания необходимого энергетического ее состояния с целью проведения требуемых процессов в идеальных или приближенных к ним условиях.

Схематично структура взаимосвязей подсистемного блока «Среда» с подсистемными блоками «Энергия» представлена на рисунке 1.

В общем случае энергетическое состояние среды будут определять три наиболее распространенных и изученных типа энергии: механическая, тепловая и внутриматериальная.

Механическая энергия может вноситься, в рабочий объем аппарата, двумя способами – непосредственно с подаваемыми в аппарат компонентами фаз, составляющими рабочую среду в данный момент времени и при

помощи рабочих органов, подводящих механическую энергию в ту или иную область среды, либо периодически, либо постоянно. В нашем случае механическая энергия, а точнее гидромеханическая энергия, передается обрабатываемой к среде от рабочего колеса центробежного насоса с целью создания заданной скорости сдвига и, в конечном итоге, заданной производительности аппарата. Как будет показано ниже, скорость сдвига оказывает сильное влияние на эффективную вязкость обрабатываемой среды. Выбор величины скорости сдвига имеет, чрезвычайно важное, значение для организации движения неньютоновских жидкостей по коммуникационным трубопроводам и каналам технологического оборудования.



**Рис. 1. Структура подсистемы «Энергия» и ее взаимосвязь с блоком «Среда» [2]**

Тепловая энергия может подводиться, непосредственно, с фазовыми потоками или через теплопередающие поверхности представительных элементов, находящихся, или внутри рабочего объема аппарата, или включенных в циркуляционный трубопровод, а так же аккумулироваться в результате диссипации механической энергии. Подвод тепловой энергии к обрабатываемой среде является важным условием успешного проведения ВТФО ЗС. Более того, как показывают исследования различных авторов [2], скорость нагрева во многом определяет эффективность проведения ВТФО ЗС и выход спирта. Поэтому при разработке аппарата необходимо выбрать такую конструкцию теплообменного устройства, которая позволила бы проводить подвод и отвод тепловой энергии в интенсивном режиме и легко организовать смену процессов нагревания и охлаждения в одном аппарате без каких либо дополнительных устройств.

Внутриматериальная энергия вливается в общий энергетический баланс уже в течение процесса трансформации среды в рабочем объеме аппарата. Величина этой энергии зависит от количественного и качественного состава среды и наличия, ускоряющих или ингибирующих химическую или биохимическую реакции, факторов, таких как тип и концентрация амилолитических и глюколитических ферментов.

Перечисленные выше виды энергии являются традиционными и поддаются в той или иной мере описанию на основе физических, химических, биологических законов с достаточной степенью точности и воспроизводимостью во времени.

Однако желание интенсификации уже существующих и, казалось бы, изученных технологических процессов всегда ставит перед исследователями непреодолимые проблемы, объяснение которых, с позиций уже имеющихся традиционных знаний, становится невозможным. В качестве примера можно привести влияние времени замачивания измельченного зерна на максимальную вязкость суспензии притом, что, предшествующие тенденции в изменении вязкости не наблюдались [3].

Поэтому, на наш взгляд, описание блока «Энергия» только тремя представленными выше источниками не является достаточно полным и должно рассматриваться в совокупности с другими, возможно и нетрадиционными, и, поэтому практически неизученными, видами энергии, составляющими единую энергетическую общность в пространстве и во времени. Таким нетрадиционным видом внешнего подвода энергии может являться ультразвуковое воздействие на среду, которое предлагается некоторыми исследователями [4–6], с целью интенсификации процессов клейстеризации и разжижения, а, в дальнейшем, и осахаривания сула.

Первым шагом при анализе второго подсистемного блока «Энергия» является изучение той гидродинамической обстановки в рабочей среде, которая способна обеспечить идеальные условия проведения процесса, т.е. независимо от конструкции аппарата оцениваются все факторы, способствующие созданию этих условий. К таким факторам относятся: скорости и направление движения фаз, их объемное содержание, режимы движения фаз и структура потоков, требуемая равномерность распределения фаз и компонентов среды по объему аппарата. Энергетическое состояние среды будут определять такие параметры как: турбулентность среды, ее температура, давление, их распределение по объему. В результате решается одна из основных задач гидродинамики – количественная оценка диссипации энергии по объему среды в каждой точке рабочего объема. С учетом последнего появляется возможность перейти ко второму этапу изучения подсистемы «Энергия» – рассмотрению процессов переноса теплоты и массы. По результатам анализа первой подсистемы «Среда», а так же, учитывая требования, предъявляемые технологическим регламентом исследуемого процесса, оцениваются возможные направления тепловых и массовых потоков, их движущая сила и поверхности тепло- и массопередачи. Далее прогнозируется, с использованием тех или иных теоретических представлений, ожидаемые коэффициенты тепло- и массопередачи и, как следствие, определяются количественные значения потоков тепла и массы. В результате появляется возможность сравнить скорость изменения состава рабочей среды, полученную из анализа первого блока для идеальных условий, со скоростью этого изменения, вытекающей из рассмотрения подсистемы «Энергия». В итоге расхождение или сходимост полученных данных позволит вычислить «узкие» места, возникающие на том или ином этапе проведения процесса и, либо устранить их, либо удовлетворится имеющимися возможностями и отказаться от достижения идеальных условий, при которых выход целевого продукта был бы максимальным. Таким образом, при завершении анализа второго подсистемного блока «Энергия», у исследователя имеются данные: по требуемой величине и геометрии рабочего объема аппарата; количеству и местам расположения патрубков для подвода компонентов фаз и энергий; требуемой поверхности теплообмена, а также информация, о необходимости ввода в ту или иную область рабочего объема перемешивающих и диспергирующих устройств, предназначенных для подвода энергии и редиспергирования фаз и компонентов среды. С учетом последних требований приступают к анализу третьей подсистемы – «Аппарат», то есть фактически к конструированию самого технологического аппарата со всеми необходимыми для его нормальной работы устройствами, коммуникациями и автоматикой.

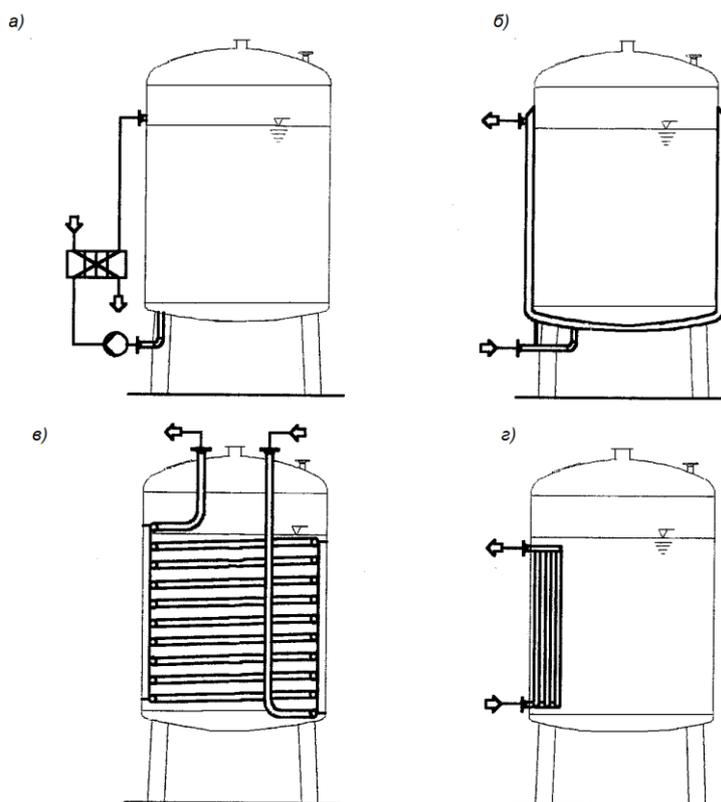
На этом этапе уточняется форма рабочего объема, тип перемешивающих и диспергирующих устройств, их динамические параметры, а также все остальные необходимые для поддержания необходимого гидродинамического режима конструктивные элементы, позволяющие разработать и выполнить рабочие чертежи аппарата.

Из рассмотрения подсистемного блока «Энергия» видно, что технологический аппарат для проведения в нем ВТФО ЗС должен реализовать в своей конструкции эффективный подвод тепловой энергии и заданную

скорость движения в рабочем объеме. Конструкции теплопередающих устройств могут быть разделены на две группы: конструкции непосредственно встроенные в технологический аппарат и выносные (рис 2).

Встроенные конструкции теплообменных устройств могут располагаться как снаружи технологического аппарата (рис. 2,б), так и внутри его (рис. 2в, г).

Выносные конструкции (рис. 2а) обычно представляют собой отдельный теплообменный аппарат. Наиболее широкое распространение в пищевой, химической и биотехнологической отраслях промышленности получили такие конструкции теплообменных аппаратов, как кожухотрубные, пластинчатые, спиральные и другие.



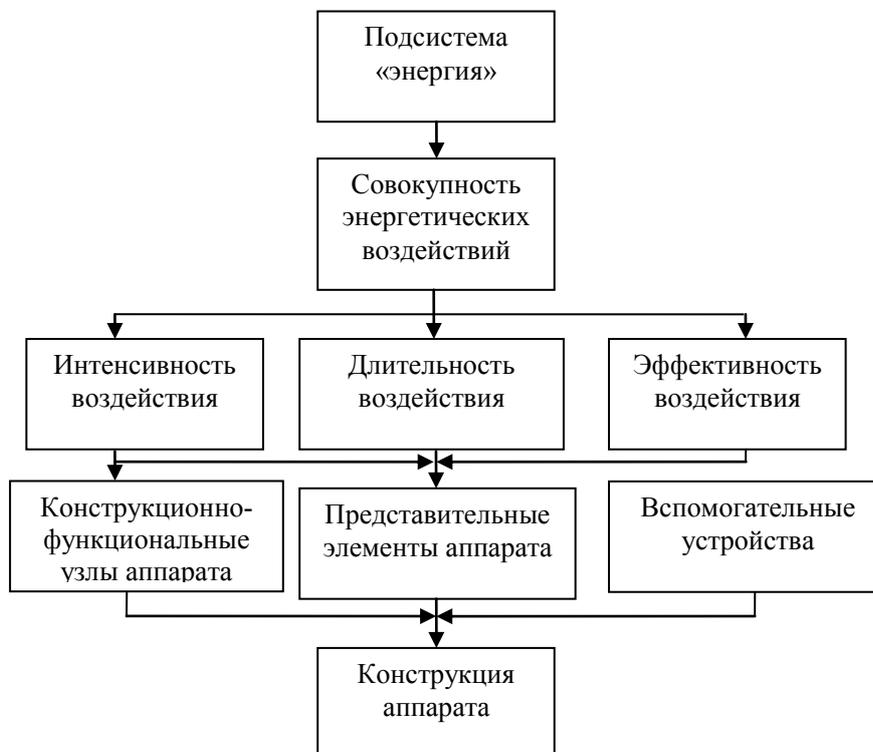
**Рис. 2. Конструкции теплообменных устройств в емкостных аппаратах**

Каждая из конструкций обладает определенными преимуществами и недостатками, если рассматривать их с позиции применения к процессу ВТФО ЗС. В частности, учитывая влияние скорости сдвига на эффективную вязкость обрабатываемой среды, в емкостном аппарате необходимо будет поддерживать определенную скорость ее циркуляции в аппарате [7-10]. Это можно выполнить двумя способами. Либо установить механические перемешивающие устройства, либо организовать циркуляцию жидкости через технологический аппарат. Установка перемешивающих устройств обычно усложняет конструкцию и снижает ее надежность в эксплуатации, особенно при обработке таких сложных жидкостей с изменяющейся структурой и большой величиной эффективной вязкости. Поэтому наиболее подходящей конструкцией рабочего объема технологического аппарата будет емкость без встроенных, внутрь рабочего объема, подвижных перемешивающих и теплообменных устройств. Отсутствие их позволит проводить надежную мойку и дезинфекцию рабочего объема аппарата. Заданную скорость сдвига, в этом случае, можно обеспечить за счет принудительной циркуляции среды с помощью насоса (например, как на рис. 2а), а подвод или тепловой энергии организовать при помощи тепловой рубашки (например, как на рис. 2.б). Однако эффективность переноса тепловой энергии будет недостаточно высокой ввиду большого температурного градиента в рабочем объеме. Поэтому, наиболее рациональным, для решения поставленной задачи будет вариант конструкции технологического аппарата представленный на рис. 2а.

Учитывая, структурно-механические характеристики обрабатываемой среды и, принимая во внимание гидравлические и теплообменные характеристики, наиболее подходящей конструкцией теплообменного аппарата

будет кожухотрубный теплообменник. Эти конструкции обладают более малыми гидравлическими сопротивлениями, при достаточно высоких значениях коэффициента теплопередачи по сравнению с пластинчатыми теплообменниками.

Схема, представленная на рис. 3, иллюстрирует принципиальные направления взаимосвязей подсистем «Энергия» и «Аппарат». Она не исключает, а подразумевает итеративность процедуры завершения аппаратного оформления процесса ВТФО ЗС, т.е. возможность возврата к подсистемам «Среда» и «Энергия» и от них, снова к уточнению параметров в блоке «Аппарат».



**Рис. 3. Структура подсистемы «Аппарат» и ее взаимосвязь с блоком «Энергия»**

Рассмотренный выше подход к анализу процессов, происходящих в многофазной среде при проведении ВТФО ЗС, нацелен на моделирование и создание наиболее совершенной конструкции аппарата. Однако часто наблюдаются отклонения от требуемых условий по причинам, носящим объективный и субъективный характер.

В результате анализа процесса ВТФО ЗС по вышеизложенному принципу можно точно предсказать производительность аппарата по целевому продукту и все затраты, связанные как с его созданием, так и с его эксплуатацией. Достаточно подробное рассмотрение каждого блока позволяет детально представить картину всех важнейших процессов, которые будут происходить в течение всего периода работы аппарата, что, в свою очередь, позволит обеспечить контролирование всех основных параметров, отвечающих за выполнение заданного технологического процесса во времени.

### Список литературы

1. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Гуляева Ю.Н. Системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала в технологии производства пищевого этанола. 1. Анализ блока «Среда» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 4. с. 236-243.
2. Баракова Н.В. Разработка технологии этилового спирта при пониженных температурных режимах водно-тепловой и ферментативной обработке высококонцентрированных замесов из ячменя // Дисс. канд. техн. наук. – СПб., – 2010. – 100с.
3. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Петрова Д.Л. Влияние времени замачивания измельченного ячменного зерна на вязкость водно-зерновой суспензии // VI Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» – СПб.: НИУ ИТМО, ИХиБТ, – 2013 – с. 630-632.

4. Громов С.И. Прогрессивная теплоэнергосберегающая схема механико-ферментативной обработки сырья для спиртовых заводов малой мощности. // Ликероводочное производство и виноделие – 2011, –№ 3,– с.7-10.
5. Смирнова И.В. Интенсификация технологии спирта с использованием ультразвука в процессе водно-тепловой обработки пшеницы. // Автореферат диссертации к.т.н. – М., МГУПП, –2007, –20с.
6. Смирнова И.В., Кречетникова А.Н., Гернет М.В. Способ получения суслу в производстве спирта с ультразвуковой обработкой зерна // Хранение и переработка сельхозсырья – 2007., №9, –с. 67-68.
7. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Ибрагимов Т.С. Характерные особенности изменения реологических свойств водно-зерновых суспензий в процессе водно-тепловой обработки (ВТО) зернового сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств, 2013. № 1.
8. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Гуляева Ю.Н., Мераджи В.В. Течение водно-зерновых суспензий в трубах. 1. Реологические характеристики водно-зерновых суспензий и их изменение в процессе водно-тепловой обработки. / Материалы IV Международной науч.-практ. конф. 22-23 мая 2014 г. Фед. Агенство научн. организаций, Гос. научн. учреждение Краснодарский НИИ хранения и переработки с.-х. продукции. Краснодар, 2014, С.264-269.
9. Новоселов А.Г., Чеботарь А.В., Гуляева Ю.Н. Экспериментальное исследование гидравлических сопротивлений при течении водно-зерновых суспензий в трубах // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3. С. 273-284.
10. Новоселов А.Г., Баракова Н.В., Ибрагимов Т.С. Периодический способ производства спирта и кожухотрубный струйно-инжекционный аппарат, используемый при осуществлении способа // Патент РФ №2499050 , МПК С12Р 7/16, Бюл. № 32 – С.10.

### References

1. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Gulyaeva Yu.N. Sistemnyi podkhod k analizu protsessa vodno-teplovoy i fermentativnoy obrabotki zernovogo materiala v tekhnologii proizvodstva pishchevogo etanola. 1. Analiz bloka «Sreda» *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2014. № 4. s. 236-243.
2. Barakova N.V. Razrabotka tekhnologii etilovogo spirita pri ponizhennykh temperaturnykh rezhimakh vodno-teplovoy i fermentativnoy obrabotke vysokokontsentrirrovannykh zamesov iz yachmenya // Diss. kand. tekhn. nauk. – SPb., – 2010. – 100s.
3. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Petrova D.L. Vliyanie vremeni zamachivaniya izmel'chennogo yachmennogo zerna na vyazkost' vodno-zernovoi suspenszii // VI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Nizkotemperaturnye i pishchevye tekhnologii v XXI veke» –SPb.: NIU ITMO, IKhIBT,– 2013 – s. 630-632.
4. Gromov S.I. Progressivnaya teploenergoberegayushchaya skhema mekhaniko-fermentativnoy obrabotki syr'ya dlya spirtovykh zavodov maloi moshchnosti. *Likervodochnoe proizvodstvo i vinodelie* – 2011, –№ 3,– s.7-10.
5. Smirnova I.V. Intensifikatsiya tekhnologii spirita s ispol'zovaniem ul'trazvuka v protsesse vodno-teplovoy obrabotki pshenitsy. // Avtoreferat dissertatsii k.t.n. – М., МГУПП, –2007, –20s.
6. Smirnova I.V., Krechetnikova A.N., Gernet M.V. Sposob polucheniya susla v proizvodstve spirita s ul'trazvukovoi obrabotkoi zerna. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* – 2007., №9, –с. 67-68.
7. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Ibragimov T.S. Kharakternye osobennosti izmeneniya reologicheskikh svoystv vodno-zernovykh suspenszii v protsesse vodno-teplovoy obrabotki (VTO) zernovogo syr'ya. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*, 2013. № 1.
8. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Gulyaeva Yu.N., Meradzhi V.V. Tечenie vodno-zernovykh suspenszii v trubakh. 1. Reologicheskie kharakteristiki vodno-zernovykh suspenszii i ikh izmenenie v protsesse vodno-teplovoy obrabotki. / Materialy IV Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. 22-23 maya 2014 g. Fed. Aгенstvo nauchn. organizatsii, Gos. nauchn. uchrezhdenie Krasnodarskii NII khraneniya i pererabotki s.-kh. produktsii. Krasnodar, 2014, S.264-269.
9. Novoselov A.G., Chebotar' A.V., Gulyaeva Yu.N. Eksperimental'noe issledovanie gidravlicheskh soprotivlenii pri techenii vodno-zernovykh suspenszii v trubakh. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2014. № 3. S. 273-284.
10. Novoselov A.G., Barakova N.V., Ibragimov T.S. Periodicheskii sposob proizvodstva spirita i kozhukhotrubnyi struino-inzhektionsnyi apparat, ispol'zuemyi pri osushchestvlenii sposoba // Patent RF №2499050 , МПК S12R 7/16, Byul. № 32 – S.10.