

УДК 637.143

Системный подход к анализу процесса водно-тепловой и ферментативной обработки зернового материала в технологии производства пищевого этанола.

1. Анализ блока «Среда»

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

Чеботарь А.В. strategiay@mail.ru, **Гуляева Ю.Н.**

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье представлен системный подход к анализу процессов водно-тепловой и ферментативной обработки зерна. Показано, что при его проведении целесообразно выделить три основных подсистемных блока - «Среда», «Энергия» и «Аппарат». Установлена их взаимосвязь и подробно рассмотрен первый подсистемный блок «Среда». Выделены основные физические и теплофизические параметры, определяющие состояние среды и их изменение в течение времени. К таким параметрам относятся значения плотности и коэффициента динамической вязкости водно-зерновых замесов, которые изменяются в течение времени проведения процесса, а также зависят от температуры и концентрации ферментов.

Ключевые слова: физические и теплофизические параметры, водно-зерновая суспензия.

Systematic approach to the analysis of process water-heat and enzymatic treatment of the grain material in the production technology of edible ethanol.

1. Analysis of the block "Medium"

D.Sc. Novoselov A.G. dekrsh@mail.ru,

Chebotar A.V. strategiay@mail.ru, **Gulyaeva Yu.N.**

ITMO University

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

A systematic approach on analysis the processes of water- heat and enzymatic treatment of the grains is in the article. There are three main system units: "Medium", "Energy" and "Equipment". There found an interrelation between the units and the first unit "Medium" has been checked in details. The general physical and thermo-physical parameters, that define condition of the medium and their changes in time, have been discovered. The parameters as density and μ (dynamic viscosity) of the water-grain suspensions, which vary during the process, also depend on temperature and concentration of enzymes.

Keywords: physical and thermo-physical parameters, grain-water suspension.

Промышленное производство целевых продуктов при помощи микроорганизмов получило наиболее масштабное распространение в спиртовой, дрожжевой и пивоваренной промышленности.

Совершенствование процессов и аппаратов этих биотехнологических производств является важнейшей научно-технической задачей, которая неизбежно связана с созданием новых современных производств, оснащенных высокоэффективным технологическим оборудованием.

Процесс водно-тепловой, ферментативной обработки зернового сырья (ВТФО ЗС) является одной из важнейших технологических стадий производства этанола из крахмалосодержащего сырья. От эффективности его проведения во многом зависит производительность спиртовых заводов и качество целевого продукта.

Основной целью данной стадии является перевод нативных углеводов, содержащихся в зерне в виде твердой фазы (крахмала), в водорастворимые углеводы (глюкозу, мальтозу, фруктозу), которые, в дальнейшем, на стадии брожения, будут являться питательной средой для микроорганизмов, синтезирующих этанол в процессе метаболизма.

Для технической реализации этого процесса, предложено множество различных технологических режимов и конструкций аппаратов, имеющих друг перед другом, как определенные преимущества, так и недостатки. Выбор той или иной, уже существующей конструкции аппарата, или разработка новой, для конкретного технологического режима, представляет достаточно сложную задачу, т.к. процесс ВТФО ЗС является сложным, многофакторным процессом и недостаточно изученным. Поиск ее эффективного решения требует всестороннего анализа, происходящих в обрабатываемой среде, явлений.

На кафедре «Процессы и аппараты пищевых производств» СПбНИУ ИТМО предложен новый способ совершенствования производства спирта из зернового сырья. Он заключается в последовательном поведении трех технологических стадий в одном аппарате [1]. Такое, в некотором роде не стандартное решение, позволяет значительно упростить машинно-аппаратурную схему производства, но, для разработки аппарата, способного реализовать эту идею требуются научно-обоснованные методики его расчета.

Согласно [1] авторами предложено проводить три стадии технологического процесса производства этанола в кожухотрубном струйно-инжекционном бродильном аппарате. К этим технологическим стадиям относятся: водно-тепловая ферментационная обработка измельченного зерна, его осахаривание и сбраживание спиртовыми дрожжами. Очевидно, что эти три стадии технологического процесса имеют свои индивидуальные характеристики, которые неизбежно должны найти отражение в конструкции аппарата. Расчет такого многофункционального аппарата новой конструкции не возможен без системного подхода к изучению процессов, происходящих в нем. Таким образом, основной задачей системного подхода является помощь конструктору в том, чтобы разобраться в научных принципах построения и оптимизации структуры аппаратного оформления при его разработке.

К настоящему времени разработан целый ряд декомпозиционных методов структурного анализа в пищевой системологии, которые представлены в работе [2].

В данной работе мы остановимся на проведении системного подхода к анализу первой технологической стадии, подлежащей проведению в КСИБА, а именно, стадии водно-тепловой, ферментационной обработке измельченного зерна.

В работе [3] был предложен достаточно простой системный подход к анализу процессов, происходящих в многофазных средах химических и биотехнологических производств. По своей сути предложенный метод основывается на многоуровневом иерархическом принципе анализа физико-химической системы разработанной академиком Кафаровым В.В., и был упрощен для удобства понимания и систематизации полученных данных.

В основу этого подхода положены три подсистемных блока условно названные «Среда», «Энергия» и «Аппарат», (рис. 1). Стратегия этого подхода заключается в последовательном, детальном анализе подсистемных блоков, начиная с блока «Среда». При этом, блок «Среда» рассматривается независимо от последующих блоков и, как правило, тесно связан с технологическим процессом обработки сырья на данной стадии.



Рис. 1. Основные подсистемные блоки [3]

Подсистема «Энергия», являющаяся центральной, включает в себя совокупность энергетических воздействий на подсистему «Среда» и определяющей конструкционные особенности подсистемы «Аппарат».

Под блоком «Среда» понимается сформированная из различных веществ рабочая среда. При проведении ВТФО ЗС эта рабочая среда образуется во время замачивания измельченного зерна водой в определенном соотношении вода – зерно. Выбор этого соотношения определяется предполагаемой технологией производства на конкретном предприятии. В настоящее время предпочтение отдается низкотемпературным схемам проведения ВТФО ЗС при высоких концентрациях твердой фазы в замесе (гидромодуль 1:2,5).

Таким образом, на начало процесса имеем рабочую среду, обладающую вполне определенным химическим составом компонентов, а, следовательно, и определенными физическими, теплофизическими и структурно-механическими свойствами. В нашем случае рабочая среда будет представлять собой двухфазную, многокомпонентную структуру, качественный и количественный состав которой будет изменяться с течением времени под влиянием внешних условий (температуры, давления), а также под влиянием происходящих в самой среде каталитических процессов, обусловленных присутствием амилолитических ферментов. Более того, эта среда является системой со стирающейся памятью, что вызвано необратимостью изменения количественного и качественного состава фаз под влиянием, проходящих в ней физико-химических процессов.

Как правило, начальный и конечный состав рабочей среды задан технологическим регламентом, определяющим его изменение в требуемом направлении. Следовательно, его физические, теплофизические и структурно-механические свойства будут вполне конкретны и могут быть исследованы и определены численно.

Рассмотрение данного подсистемного блока сводится к изучению трансформации среды, как физического явления, на основе реализации принципа пространственно-временной декомпозиции сложного процесса с учетом происходящих изменений ее физических, теплофизических и структурно-механических свойств.

Схематично структура и последовательность анализа названной подсистемы представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Формирование подсистемного «Среда» на конкретной стадии технологического процесса

На начальном этапе рассмотрения подсистемы «среда», во-первых, оцениваются предельные возможности изменения состава рабочей среды в идеальных условиях в направлении получения целевого продукта и, во-вторых, определяются все физические, теплофизические и структурно-механические свойства среды, необходимые для расчета скорости ее трансформации в направлении получения целевого продукта. Применительно к процессу ВТФО ЗС, наиболее распространенными свойствами среды, значения которых необходимо знать, являются: плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоемкости и др. Для рассматриваемой среды, в нашем случае, эти параметры неизвестны. Отсюда возникает задача их определения.

В первую очередь необходимо выполнить качественный анализ структуры среды при образовании водно-зерновой суспензии, и ее изменения в процессе ВТФО.

Уже на начальной стадии формирования среды, которая в дальнейшем будет представлять собой водно-зерновую суспензию, возникает проблема выбора контроля ее качественного состава, несмотря на кажущуюся простоту рецептуры. Влияние свойств исходных компонентов среды на ее дальнейшие свойства представлены на рис. 3. В частности, формирование заданного гидромодуля ведется по массовому соотношению измельченное зерно – вода. Однако, в зависимости от используемого способа измельчения, зерновая фракция будет иметь различный гранулометрический состав.

Более того, как показывают результаты исследования, представленные в работе [4], от гранулометрического состава зернового сырья, поступающего на формирование среды, будет зависеть ее химический состав. Если в зерновом материале, идущем на составление исходной среды, преобладают частицы крупных размеров, то в единице массы среды будет находиться больше

целлюлозы и меньше крахмала. Для промышленного производства, когда все зерновое сырье измельчается и поступает на переработку без остатка, это не имеет определяющего значения. При проведении экспериментальных исследований этот факт будет играть важную роль в получении воспроизводимых результатов измерений физических, теплофизических и структурно-механических свойств, т.к. при отборе небольших объемов проб для исследований, гранулометрический состав индивидуальной пробы может существенно отличаться от общего гранулометрического состава всего измельченного материала. По этой причине, для получения объективных результатов исследований, необходимо проводить несколько опытов с последующим осреднением результатов измерений и оценкой отклонений от наиболее вероятных значений. Очевидно, что, чем больше имеется известных параметров для оценки физических, теплофизических и структурно-механических свойств среды, тем точнее можно предсказать ее поведение при анализе второй подсистемы «Энергия».



Рис.3. Влияние свойств исходных компонентов среды на ее дальнейшие свойства

Известно, что структурно-механические свойства среды взаимосвязаны с ее физическими свойствами и определяют скорость переноса импульса, тепловой энергии и массы веществ в этой среде. При рассмотрении этих процессов в аппарате, конструкция которого известна, или предполагается к разработке, приходится рассматривать среду, с одной стороны - как единое вещество с определенными физическими свойствами, с другой – как трехфазную систему с индивидуально выраженными физическими свойствами каждой из фаз. С первым случаем сталкиваемся при расчете энергозатрат на транспортировку водно-зернового затора по каналам технологического аппарата, в котором происходит

процесс ВТФО непосредственно, и по коммуникационным трубопроводам, связывающих между собой технологические аппараты последующих стадий, а также при расчете подводимой энергетической мощности к среде, для турбулизации ее жидкой фазы и диспергирования твердой фазы. Во втором случае, необходимо знать физические свойства твердой и жидкостной фаз в отдельности, т.к. эти свойства будут определять движущую силу массообменных процессов между контактирующими между собой фазами.

С позиций изучения гидродинамики течения водно-зерновой суспензии по трубам представляет знание величины ее динамической вязкости и плотности. Изменение этих параметров в процессе проведения ВТФО ЗС связано с необходимостью повышения температуры обрабатываемой среды до температуры заданной технологическим режимом, и введением в среду амилолитических ферментных препаратов.

Качественное изменение состава среды в процессе ВТФО, в первую очередь, связано с расщеплением молекул нативного крахмала, которое, последовательно, проходит через две стадии: клейстеризацию и разжижение. Физико-химическая суть клейстеризации заключается в следующем. При контакте с водой (после 50°C) между молекулами крахмала происходит встраивание большого количества молекул воды, что приводит к набуханию и последующему разрыву твердых зерен крахмала. В результате среда из классической системы жидкость - твердая фаза преобразуется в гелеобразную жидкость с отдельными включениями нерастворимой твердой фазы. Более того, еще на начальной стадии ВТФО, т.е. при температурах ниже температуры клейстеризации, в воду начинают переходить растворимые в ней вещества, содержащиеся в зерне: сахара, декстрины, и водорастворимые белки. Все это приводит к изменению объемной структуры обрабатываемой среды, ее набуханию, и, как следствие, к изменению ее структурно-механических свойств, к резкому увеличению вязкости среды и снижению ее плотности. Причем вязкость среды будет зависеть еще и от вида зерновой культуры и, в первую очередь, из-за различного содержания в ней нативного крахмала.

Физико-химическая суть разжижения заключается в разрыве длинных цепочек крахмала, состоящих из амилозы и амилопектина на короткие цепочки при помощи фермента α - амилазы. Схематично, на молекулярном уровне, последовательность процесса разжижения может быть представлена в виде, показанном на рис. 4.

Без повышения температуры и в отсутствии ферментов процесс набухания крахмала длится достаточно долго. Для его ускорения обычно увеличивали температуру обрабатываемой среды от 100°C до 177°C в зависимости от продолжительности реакции [6]. Позднее, технология ВТО была заменена технологией ВТФО ЗС, что заключалось в снижении температурной нагрузки и повышением ферментной.

При проведении ВТФО ЗС процесс разжижения происходит достаточно быстро, его скорость зависит от концентрации вносимого фермента, что, в конечном итоге, приводит к резкому снижению вязкости клейстеризованной среды. Кроме нативного крахмала, в зерне, как упоминалось выше, содержатся белковые вещества, целлюлоза и гемицеллюлоза. Эти вещества образуют стенки клеток ячменного зерна в тесном соединении с β -глюканом, содержащимся в гемицеллюлозе. В работе [5] отмечается, что это вещество склонно к гелеобразованию при определенных температурных условиях. Таким образом, при изучении процесса ВТФО ЗС необходимо начать с получения зависимостей плотности и коэффициента динамической вязкости от температуры, T . Учитывая, что водно-зерновая суспензия при своем движении проявляет свойства характерные для неньютоновских жидкостей [6], то необходима оценка коэффициента динамической вязкости и от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для каждого температурного значения.

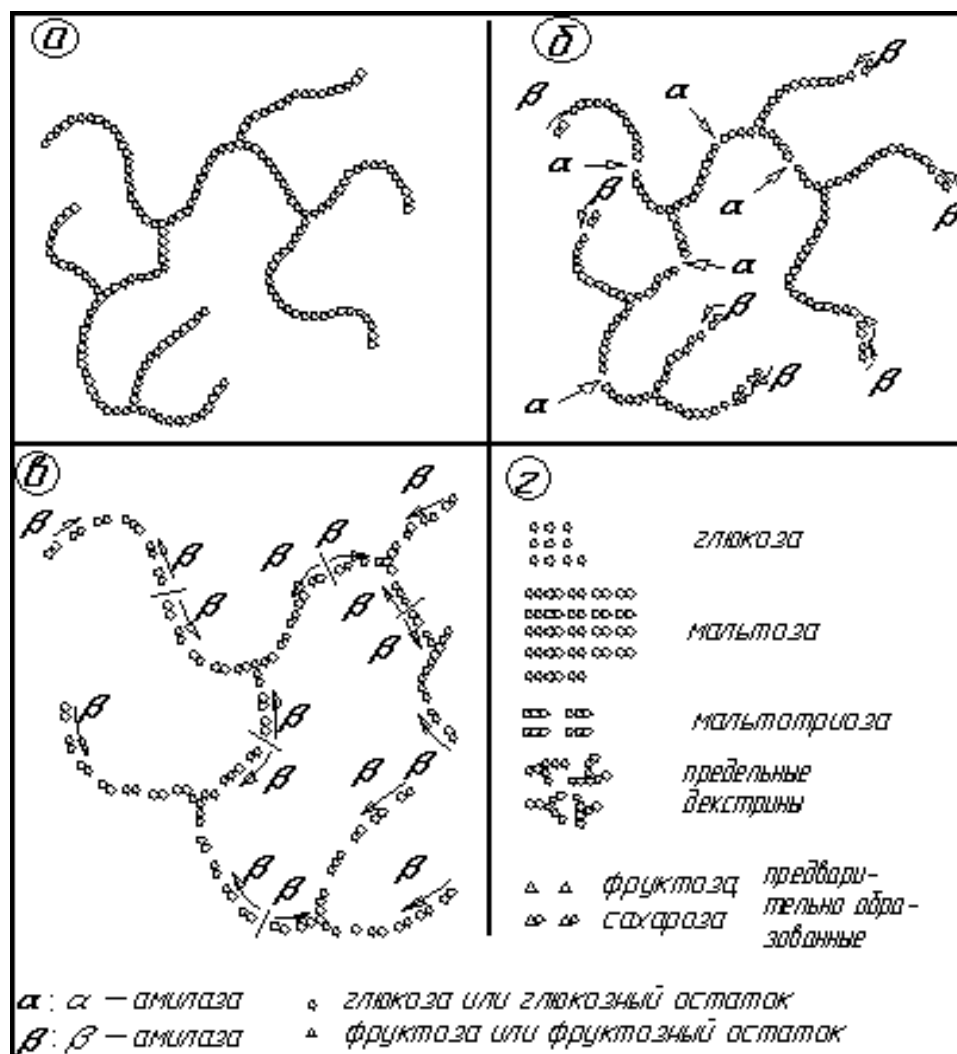


Рис. 4. Схематичное изображение процесса разжижения, основанное на модели расщепления молекул клейстеризованного крахмала [5]

Более того, при исследовании вышеупомянутых параметров, на их значение будет оказывать влияние концентрация ферментного препарата $C_{ф.п.}$, применяемого для разжижения суспензионной массы. В общем случае для каждого исследуемого гидромодуля необходимо получить обобщенные зависимости следующего вида

$$\rho = f(T, C_{ф.п.}) \tag{1}$$

и

$$\mu = f(T, \dot{\gamma}, C_{ф.п.}) \tag{2}$$

Получение этих зависимостей в явном виде позволит перейти к оценке изменения теплофизических свойств водно-зерновой суспензии в процессе ВТФО, а точнее, к оценке коэффициентов теплоемкости $c_{з.с.}$ и теплопроводности $\lambda_{з.с.}$, которые будут необходимы при рассмотрении второго блока «Энергия». В результате исследования теплофизических свойств водно-зерновой суспензии в широком диапазоне гидромодулей, температур, при выбранной концентрации ферментного препарата будут получены математические зависимости в виде

$$c_{z.c} = f(T, C_{ф.п}) \quad (3)$$

и

$$\lambda_{z.c} = f(T, C_{ф.п}) \quad (4)$$

Открытым остается вопрос о влиянии времени контакта измельченного зерна с водой на указанные выше физические, теплофизические и структурно-механические свойства суспензии. Следует предположить, что влияние этого фактора будет существенно определять скорость изменения этих свойств. Поэтому при постановке экспериментов по измерению ρ и μ , а также $c_{z.c}$ и $\lambda_{z.c}$ необходимо учитывать это влияние, т.е. стремиться, чтобы время пребывания было во всех экспериментах одним и тем же.

Список литературы

1. Новоселов А.Г., Баракова Н.В., Ибрагимов Т.С. Периодический способ производства спирта и кожухотрубный струйно-инжекционный аппарат, используемый при осуществлении способа // Патент №2499050 РФ, МПК С12Р 7/16, Бюл. №32 – С.10.
2. Орлов В.В., Сабуров А.Г. Системный подход в пищевой инженерии: декомпозиционно-морфологический метод совершенствования процессов и аппаратов. – СПб., СПбГУНиПТ, –2005. – 160с.
3. Новоселов А.Г. Системный подход к анализу процессов в многофазных средах химических и биохимических производств. // Химическое и нефтяное машиностроение, –1996, №3, – с. 3-5.
4. Губрий Г.Г. Влияние состава фракций измельченного зерна на выход спирта // Пищевая промышленность, –1995, № 7, – с. 24-25.
5. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива: пер. с нем. – СПб., Изд-во «Профессия», –2003. – 912 с..
6. Старк У.Х. Производство спирта из зерна. // В кн. Бродильные производства.– М.: Пищепромиздат, – 1959. – с.18-68.

References

1. Novoselov A.G, Barakova N.V., Ibragimov T.S. Periodichesky the way of production of alcohol and the kozhukhotrubny jet and injection device used at implementation of a way// Patent №2499050 RF, MPK S12R 7/16, Bjul. №32 – P.10.
2. Orlov V.V., Saburov A.G. System approach in food engineering: dekompozitsionno-morphological method of improvement of processes and devices.. – SPb., SPbGUNiPT, –2005. – 160 p.
3. Novoselov A.G. System approach to the analysis of processes in multiphase environments of chemical and biochemical productions // Himicheskoe i neftjanoe mashinostroenie, –1996, №3, – P. 3 -5.
4. Gubrij G.G. Influence of structure of fractions of the crushed grain on an alcohol exit// Pishhevaja promyshlennost', – 1995, № 7, – P. 24-25.
5. Kunce V., Mit G. Tekhnologiya of malt and beer: per. s nem. – SPb., Izd-vo «Professija»,– 2003. – 912 p.
6. Stark U.H. Production of alcohol from grain // V kn. Brodil'nye proizvodstva.– M.: Pishhepromizdat, –1959. – P.18-68.