

УДК 663.551

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОТРОННЫХ ПОДСИСТЕМ В БРАГРЕКТИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

Доктор технических наук, профессор, ректор НУПТ Иванов Сергей Витальевич.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры биотехнологии продуктов брожения и виноделия, декан факультета бродильных, консервных и сахарных производств НУПТ Шиян Петр Леонидович.

Кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии продуктов брожения и виноделия НУПТ Булий Юрий Владимирович.

Национальный университет пищевых технологий.

Адрес: 01601, Украина, г. Киев, ул. Владимирская, 68.

*К 130-летию НУПТ*

Процессы перегонки бражки и очистки этилового спирта от летучих органических примесей являются завершающей стадией спиртового производства и осуществляются на брагоректификационных установках (БРУ), в которых происходят процессы тепло-массообмена между материальными потоками, движущимися по отдельным элементам установки.

При общем содержании примесей в спирте-сырце 0,3-0,5 % в их составе идентифицировано более 50 соединений, которые относятся к одной из групп химических веществ: альдегидам, кетонам, эстерам, высшим спиртам и органическим кислотам. Среди ключевых примесей преобладают уксусный, пропионовый, муравьиный, масляный и кротоновый альдегиды, кетоны – акролеин, диацетил, ацетон, уксуснометиловый, уксусноэтиловый, масляноэтиловый, диэтиловый, пропионметиловый, пропионэтиловый, изомасляноизобутиловый эфиры, изопропиловый, пропиловый, изобутиловый, бутиловый, амиловый, изоамиловый, метиловый, гексиловый, гептиловый спирты, уксусная, масляная, изомасляная, валериановая, изовалериановая, пропионовая кислоты, а также амины – метиламин, диметиламин, триметиламин, этиламин, диэтиламин, триэтиламин и др. Большинство из них являются токсичными и могут отрицательно влиять на качество товарного спирта.

Эффективность извлечения и концентрирования летучих органических соединений зависит от многих факторов: количества колонн, схемы их обвязки

паровыми и жидкостными потоками, организации отбора вторичных и побочных продуктов из зон их максимального концентрирования, их количества, температуры и давления в колоннах, эффективности контактных массообменных устройств, способов контакта фаз на поверхности тарелок и др.

При использовании традиционных способов очистки спирта от примесей на типовых БРУ некоторые из них в незначительных количествах все-таки присутствуют в товарном спирте. Для более полного их выделения в схемы БРУ кроме основных ректификационных колонн включают дополнительные – сивушную, разгонную и колонну окончательной очистки. На рис.1 схематически показано движение основного продукта, полупродуктов и отходов брагоректификации по элементам БРУ, их содержание указано в процентах от абсолютного алкоголя (а. а.) бражки.

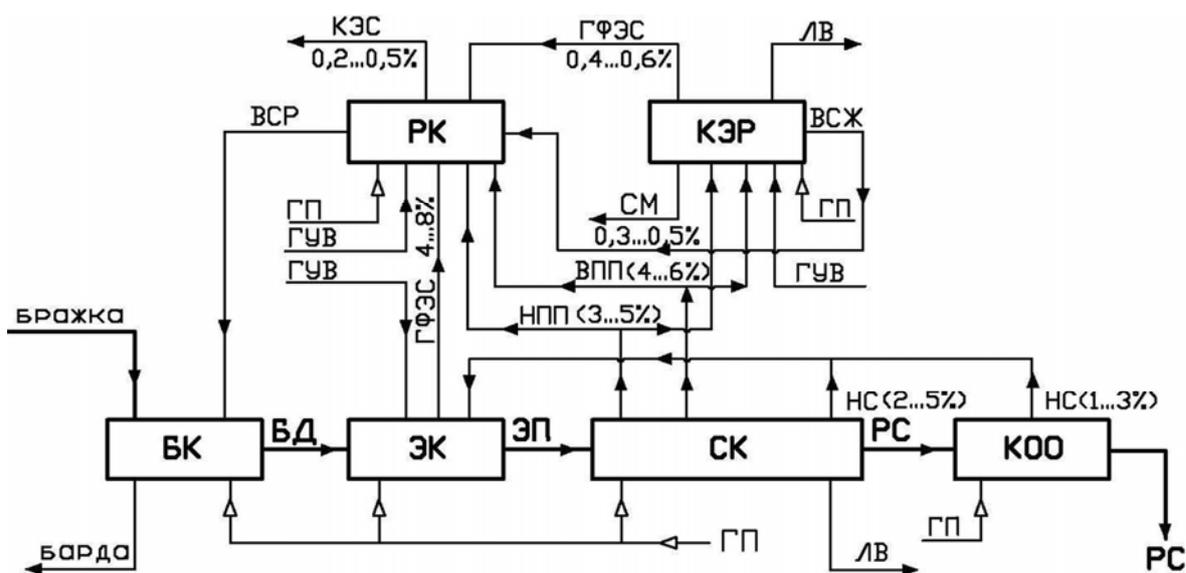


Рис.1. Схема движения спиртосодержащих потоков, обогащенных летучими органическими соединениями, по элементам БРУ.

Условные обозначения:

БК – бражная колонна; ЭК – эспуриационная колонна; СК – спиртовая колонна; КОО – колонна окончательной очистки; РК – разгонная колонна; КЭР – колонна экстрактивной ректификации; БД – бражной дистиллят; ЭП –эспурат; РС – ректифицированный спирт; ГФЭС – головная фракция этилового спирта; КЭС – концентрат эстеров-сивушный; ЛВ – лютерная вода; ВСЖ – водно-спиртовая жидкость; ГП – греющий пар; ГУВ – горячая умягченная вода; СМ – сивушное масло; НПП – нижние промежуточные примеси; ВПП – верхние промежуточные примеси; НС – непастеризованный спирт.

Основными элементами тарельчатых колонных аппаратов являются контактные устройства, которые должны удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать на поверхности тарелки соответствующий запас жидкости (задержку жидкости), достижение необходимой разделяющей способности при изменении нагрузки по пару или жидкости, небольшое гидравлическое сопротивление паровому потоку, минимальный унос жидкости из нижних тарелок на верхние, возможность работы аппаратов в различных адиабатических условиях. Исследования физико-химических основ процессов разделения многокомпонентных систем, разработка на основе законов термодинамики рациональных методов расчета и конструирования ректификационных колонн, числа контактных устройств, оптимальных условий для эффективного контакта паровой и жидкостной фаз, систем автоматического контроля и управления процессами массообмена остаются актуальными проблемами и в настоящее время. Решению поставленных задач посвящено большое количество исследований, результаты которых проанализированы в монографии [1].

В НУПТ (ранее КТИПП – Киевском технологическом институте пищевой промышленности) под руководством профессора Стабникова В.Н. была основана всемирно известная школа по созданию высокоэффективных массообменных контактных устройств ректификационных колонн. Проведены первые исследования фазового равновесия бинарных и многокомпонентных систем при атмосферном давлении и давлениях, ниже атмосферного, предложены методы расчета конструкций контактных устройств для барботажного и струйного режимов, изучены оптимальные условия их действия (расстояние между тарелками, скорость пара в свободном сечении колонн и в щелях контактных элементов, их размеры, расположение и др.), приведена сравнительная характеристика эффективности их работы.

Профессор Цыганков П.С. вместе с учениками обосновал научную школу по разработке энерго- и ресурсосберегающих БРУ повышенной единичной мощности. Под его руководством разработана и внедрена в производство технология разгонки ГФЭС. Использование инновационной технологии позволило увеличить выход ректифицированного спирта с 94...96 до 98,0...98,5 %, отбор органических примесей осуществлять в виде КЭС в количестве 0,1...0,2 %.

Работы выдающихся ученых КТИПП получили всемирное признание не только в Украине, но и за ее пределами.

Продолжая традиции, используя многолетнюю практику и наработанный опыт старших поколений, специалисты НУПТ проводят системные исследования, направленные на разработку и создание энерго- и ресурсосберегающих БРУ повышенной мощности для производства пищевого, технического спирта и топливного биоэтанола. Работы в области теории и практики ректификации, выполненные в университете, были отмечены Государственной премией Украины в области науки и техники.

Под руководством профессора Тарана В.М. разработаны теоретические основы циклической ректификации, предложена конструкция колонных аппаратов, действие которых позволило обеспечить раздельное движение фаз по тарелкам, интенсифицировать процесс массообмена за счет одновременной смены жидкостной задержки на тарелках, повысить эффективность работы контактных устройств в период подачи греющего пара и сократить его расход [2].

Первые колонные аппараты циклического действия без прерывания подачи жидкостной и паровой фаз были разработаны сотрудниками НУПТ и ООО «Техинсервис-процесс». Их действие предусматривает проведение управляемых циклов задержки жидкости на тарелках и синхронного ее перелива по всей высоте ректификационной колонны в два последовательных этапа, повторяющихся периодически во времени за заданным алгоритмом [3,4].

Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях Чудновского филиала ГП «Житомирский ликероводочный завод». Объектом исследований была разгонная колонна (РК), задачей которой являлось выделение и очистка этилового спирта из фракций, наиболее обогащенных летучими органическими примесями – ГФЭС, потоков из конденсаторов бражной и спиртовой колонн, конденсатора сепаратора диоксида углерода, спиртоловушек и сивушного спирта.

Для управления циклами задержки и перелива жидкости авторами предложено включить в схему обвязки РК механотронную подсистему на основе пневмоэлектроавтоматики. Механотроника является своеобразной современной философией проектирования сложных управляемых технических объектов.

Научно-техническое решение считают механотронным, если составляющие компоненты не просто взаимодействуют друг с другом, но при этом образовавшаяся система приобретает новые свойства, которые не были свойственны ее составляющим. Механотронный подход к разработке и внедрению технологии управляемой ректификации заключается в том, что при проектировании брагоректификационного оборудования ректификационные колонны должны образовывать целостные электро-механо-пнеumo-электронные технические системы, включающие электронно-компьютерную аппаратуру. Такое техническое решение позволяет осуществлять автоматизированное управление циклами ректификации, контролировать и поддерживать технологические параметры процесса массообмена в заданных пределах [5].

Целью работы было исследование степени извлечения и кратности концентрирования ключевых органических примесей спирта в процессе разгонки спиртосодержащих фракций при использовании механотронной подсистемы управления циклами ректификации, разработка функциональной схемы автоматизации БРУ с использованием пневмоострова МРА/СРХ, построение алгоритмов и разработка программного обеспечения механотронной подсистемы.

Для достижения поставленных задач экспериментальная РК была оснащена микропроцессорной пневматикой фирмы FESTO (стандартными пневмоцилиндрами двунаправленного действия типа DNT 63-50-PPV-A), связанной через подвижные тяги с клапанами, которые поочередно открывали и закрывали переливные отверстия парных и непарных по порядку размещения тарелок за заданным алгоритмом, и современными компьютерно – интегрированными средствами (рис.2).

К основным преимуществам пневмоцилиндров типа DNT относятся простота их конструкции и технического обслуживания, полная пожаро- и взрывобезопасность, надежность работы в широком диапазоне температур в условиях, в которых существует высокий риск возгорания или взрыва газа [6].

Управление клапанами и работой пневмоцилиндров, контроль технологических параметров (температуры, давления) осуществлялся с помощью автоматических датчиков, сигнал от которых передавался на микропроцессорный контроллер. Результаты исследований приведены в таблице 1, а также представлены на рис. 3.



Рис.2. Реализация механотронной подсистемы для управления процессами массообмена в РК.

Для газохроматографического анализа отбирали пробы питания РК, ее кубовой жидкости и образовавшегося КЭС. Расход греющего пара на процесс определяли из теплового баланса, зная расход воды на охлаждение, ее температуру на входе в конденсатор и на выходе после дефлегматора.

Экспериментально установлено, что при использовании механотронной подсистемы в процессе разгонки спиртосодержащих фракций альдегиды и эстеры (головные примеси) выделяются в полном объеме, степень извлечения ( $\alpha$ ) высших спиртов (верхних промежуточных примесей) и метанола увеличивается на 38 %. При этом кратность концентрирования ( $\beta$ ) головных примесей повышается на 25 %, высших спиртов на 40 %, метанола на 37 %. При включении РК в работу выход ректифицированного этилового спирта увеличивался на 3,5 %. Его показатели соответствовали нормативным для спирта «Люкс», а показатели образовавшегося КЭС – требованиям технических условий. Расход греющего пара на процесс разгонки в условиях управляемой ректификации сократился на 40 % и составил

11-13 кг/дал а.а., введенного в колонну. Реализация электро-механо-пневмо-электронной системы управления РК позволила обеспечить раздельное движение фаз по тарелкам при непрерывной подаче жидкостного и парового потоков, увеличить поверхность контакта фаз на каждой тарелке на 20 % за счет рационального использования всей ее площади, исключить перемешивание жидкости на смежных тарелках колонны, продлить время контакта фаз для достижения фазового равновесия между жидкостью и паром, повысить эффективность массообмена и таким образом приблизить эффективность физической тарелки до эффективности теоретической.

Степень извлечения ключевых органических примесей спирта в процессе разгонки спиртосодержащих фракций в условиях типовой и управляемой ректификации

Таблица 1

Наименование органических примесей	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>			Степень извлечения примесей (α)
	питание	кубовая жидкость	КЭС	
этанол, видимая концентрация, % об.	82,0	5,0	68,0	16,4
<b>Типовая ректификация:</b>				
альдегиды	605,0	7,0	10235	86,4
эстеры	637,7	8,0	13467	79,7
сивушное масло	27307,9	1293,0	272626	21,1
метанол, %	0,026	0,0016	1,75	16,2
<b>Управляемая ректификация:</b>				
альдегиды	605,0	следы	13591,2	макс.
эстеры	637,7	следы	17905,2	макс.
сивушное масло	27307,9	793,0	462079	34,4
метанол, %	0,026	0,0010	2,66	26,0

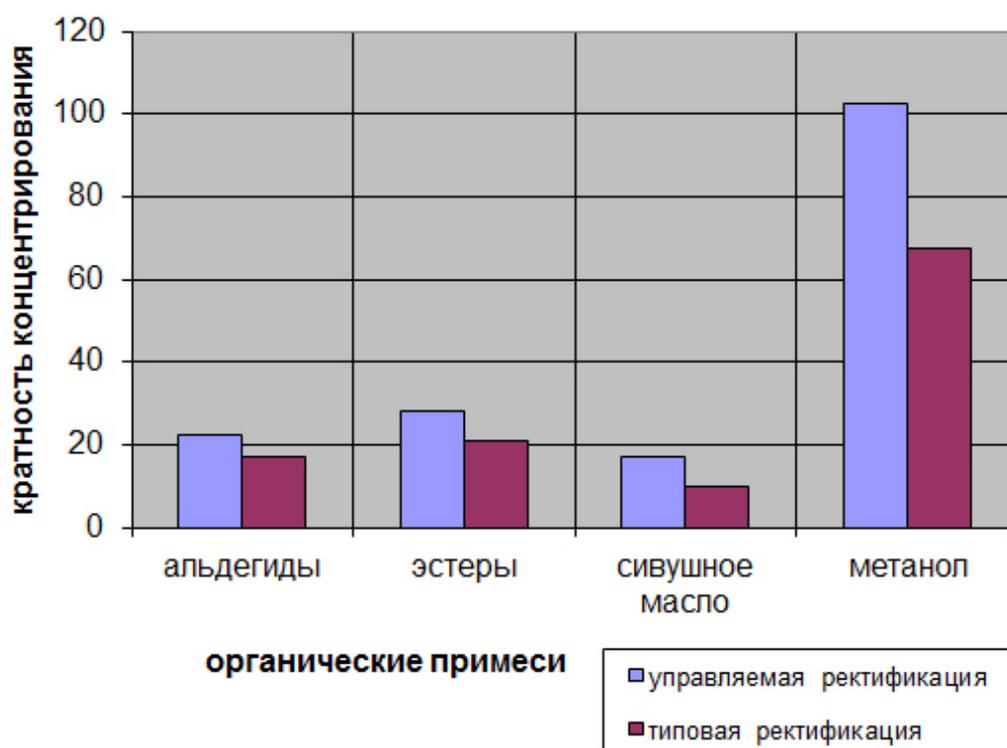


Рис. 3. Кратность концентрирования ( $\beta$ ) ключевых органических примесей спирта в условиях управляемой и типовой ректификации.

Установлено, что время пребывания жидкости на тарелке зависит от концентрации ключевых примесей спирта в питании, поэтому интервал жидкостной задержки определялся экспериментальным путем. Непрерывная подача греющего пара позволила исключить резкие колебания давления в кубовой части РК и ее дефлегматоре, которые имели место в колонных аппаратах циклического действия.

Полученные результаты исследования работы РК позволили сделать вывод о целесообразности создания и использования единой механотронной подсистемы на основе пневмоэлектроавтоматики для организации управляемых циклов массообмена в БРУ путем внедрения предложенного технического решения. Реализация инновационной технологии предусматривает включение в пневматическую схему БРУ пневмоострова 32МРА для регулирования и контроля работы пневмоприводов, установленных в верхней части бражной, элюационной и ректификационной колонн, с помощью микропроцессорного контроллера М340. Система управления включает в себя щит, в котором расположен контроллер, и

компьютер. Контроллер включает процессор, сетевой модуль, блоки аналоговых и дискретных входов/выходов. На компьютере должна быть выполнена условная визуализация технологического процесса и предоставлены необходимые средства для его управления. Для создания программного управления пневмоцилиндрами используется программная среда Unity Pro. Текст программы разработан на двух языках – FBD и ST.

Для отдаленного управления исполнительными механизмами с пневмоцилиндрами и сбора информации от дискретных датчиков об их положении через последовательный интерфейс связи, простоты монтажа пневматической системы управления за счет подключения исполнительных механизмов шлангами через быстро разъемные соединения щита управления в системе автоматизации предусмотрено использование стандартного электропневматического шкафа серии EPCB-RIO-MPA-32/32 с типом интерфейса связи Profibus-DP с блоком подготовки воздуха.

Перспективным направлением работы является проведение дальнейших исследований эффективности предложенной технологии при ее использовании в технологических процессах перегонки зрелой бражки и очистки ректификованного этилового спирта.

**Ключевые слова:** механотронная подсистема, ректификация, фазовое равновесие, массообмен, примеси спирта, управляемые циклы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шиян П.Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: Монографія. / П.Л. Шиян, В.В. Сосницький, С.Т. Олійнічук. – К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. – 424 с.
2. Патент на винахід 60565 B01D 3/00 Україна. Спосіб перетікання рідини на тарілках колонних масообмінних апаратів / Малета В.М., Щуцький І.В., Дмитрук А.П., Черняхівський Й.Б.; заявники та власники Малета В.М., Щуцький І.В., Дмитрук А.П., Черняхівський Й.Б. - № 2002129940; заявл. 10.12.2002; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10/2003.
3. Патент на изобретение 2372965 C2 B01D 3/00, B01D 3/20 (RU). Способ перелива жидкости по тарелкам колонного аппарата в процессе массообмена

между паром и жидкостью / Дмитрук А.П., Черняховский И.Б., Дмитрук П.А., Булий Ю.В.; патентообладатель Дмитрук А.П. (UA). - № 2007135886/15; заявл. 27.09.2007; - опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32/2007.

4. Булий Ю.В. Энергосберегающая технология ректификации этилового спирта / Ю.В. Булий, П.Л. Шиян, А.П. Дмитрук // Журнал «Производство спирта и ликероводочных изделий». – 2012. - №3. – с.14-16.

5. Губарев А.П. Механотроника: учеб. пособие для студ. спец. «Гидравл. и пневмат. машины» специализаций «Механотроника в машиностроении», «Приклад. гидроаэромеханика и механотроника» / А.П. Губарев, О.В. Левченко. – К.: НТУУ «КПИ», 2007. – 180 с.

6. Пашков Е.В. Электropневмоавтоматика в производственных процессах: учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по машиностр. спец. / Е. В. Пашков, Ю. А. Осинский, А. А. Четверкин; Севастоп. нац. техн. ун-т. - 2-е изд., перераб. и доп. – Севастополь: Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2003. - 496 с.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНОТРОННЫХ ПОДСИСТЕМ В БРАГРЕКТИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ**

**С.В. Иванов, П.Л. Шиян, Ю.В. Булий**

### **РЕФЕРАТ**

Авторами предложено техническое решение создания и использования механотронной подсистемы для организации управляемых циклов ректификации. Установлено, что реализация электро-механо-пневно-электронной системы управления позволяет обеспечить раздельное движение фаз при непрерывной подаче в колонну жидкостного и парового потоков, увеличить поверхность контакта фаз на 20 % в сравнении с типовой тарелкой, продлить время контакта фаз для достижения фазового равновесия между жидкостью и паром, повысить эффективность массообмена и приблизить эффективность физической тарелки до

ефективності теоретическої. В таких умовах альдегіди і естери виділяються в повному об'ємі, степеь извлечення висших спиртов і метанола збільшується на 38 %, кратність концентрування головних примісей підвищується на 25 %, висших спиртов на 40 %, метанола на 37 %. Інноваційну технологію цілесобразно використовувати для організації роботи бражної, епюраційної і спиртової колонн з метою підвищення якості товарного спирта і скорочення расхода греючого пара на процеси перегонки бражки і очищення етилового спирта.

**Ключевые слова:** механотронная подсистема, ректификация, фазовое равновесие, массообмен, примеси спирта, управляемые циклы.

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНОТРОННИХ ПІДСИСТЕМ В БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ**

**С.В. Іванов, П.Л. Шиян, Ю.В. Булій**

### **РЕФЕРАТ**

Авторами запропоновано технічне рішення створення та використання механотронної підсистеми для організації керування циклів ректифікації. Встановлено, що реалізація електро-механо-пневмо-електронної системи управління дозволяє забезпечити роздільний рух фаз під час безперервної подачі в колону рідинного та парового потоків, збільшити поверхню контакту фаз на 20 % в порівнянні з типовою тарілкою, подовжити час контакту фаз для досягнення фазової рівноваги між рідиною та паром, підвищити ефективність масообміну та наблизити ефективність фізичної тарілки до ефективності теоретичної. В таких

умовах альдегіди та естери видаляються в повному об'ємі, ступінь вилучення вищих спиртів і метанолу збільшується на 38 %, кратність концентрування головних домішок підвищується на 25 %, вищих спиртів на 40 %, метанолу на 37 %. Інноваційну технологію доцільно використовувати для організації роботи бражної, епюраційної та спиртової колон з метою покращення якості товарного спирту і скорочення витрат грюючої пари на процеси перегонки бражки і очистки етилового спирту.

**Ключові слова:** механотронна підсистема, ректифікація, фазова рівновага, масообмін, домішки спирту, керовані цикли.

## **THE USE OF MECHATRONICS SUBSYSTEMS IN RECTIFICATION INSTALLATIONS**

**S. Ivanov, P. Shiyan, Y. Buliy**

### **ARTICLE SUMMARY**

The authors of the proposed technical solution for the creation and use of mechatronics subsystem for organizing managed cycles of rectification. It is established that the implementation of electro-mechanical and pneumo-electronic management system allows you to maintain separate movement phases under the continuous supply of the column of liquid and steam flows, to increase the surface area of contact of phases by 20 %, to extend the time of contact of phases to achieve the phase equilibrium between liquid and steam, increase the efficiency of mass transfer and bring efficiency of real plates to the effectiveness of the theoretical. The aldehydes and esters are allocated in full volume, the degree of extraction of higher alcohols and methanol will

increase by 38 %, the concentration ratio of the head of admixtures increases by 25 %, higher alcohols 40 %, methanol by 37 %. Innovative technology is useful for the organization of work of column for the production of alcoholic spirits, a column for the epuration of alcoholic distillate and alcohol columns with the purpose of improvement of quality of commodity spirit and to reduce the heating steam on the processes of distillation brew and cleaning of ethyl alcohol.

**Key words:** mechatronics subsystem, rectification, phase equilibrium, mass-transfer, impurity alcohol, managed cycles.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ**

Иванов С.В. Использование механотронных подсистем в брагоректификационных установках [Текст] / С.В. Иванов, П.Л. Шиян, Ю.В. Булий // Журнал «Пиво и напитки», Издательство «Пищевая промышленность», Москва – 2014. - №3, с. 48-51.