

УДК 663.5, 664.11/12

## Математическая модель процесса образования коллоидных примесей в водно-спиртовых растворах сахаров

Никитаев П.В. [nikitaev.pavel@yandex.ru](mailto:nikitaev.pavel@yandex.ru)  
д-р техн. наук Тишин В.Б. [tishinvb@mail.ru](mailto:tishinvb@mail.ru)

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В зависимости от исходного растительного сырья, из которого был получен сахар, в его составе могут содержаться примеси нерастворимые в водно-спиртовых растворах. В статье исследуется зависимость образования коллоидных структур различных видов сахаров от концентрации спирта в растворе. Целью статьи является нахождение общей математической модели, которая будет описывать процесс образования коллоидных примесей в водно-спиртовых растворах сахаров. Приводятся графические изображения модели, наглядно характеризующие процесс. Ключевые слова: сахар, коллоидные примеси, математическая модель, мутность.*

## The mathematical model of the colloidal impurities in the water-alcohol solution of sugars formation process

Nikitayev P.V., D.Sc. Tishin V.B.

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.  
Institute of Refrigeration and Biotechnology  
191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Depending on the original herbal raw material, which sugar was obtained of, the impurities which are insoluble in the water-alcohol solutions may be contained in its composition. In the article it is investigated the dependence of the colloidal structures of different kinds of sugars formation upon the alcohol concentration in the solution. The aim of the matter is to find a general mathematical model that will describe the formation colloidal impurities in the water-alcohol solution of sugars process. The graphs of the model, visually describing the process are presented.*

**Keywords:** sugar, colloidal impurities, mathematical model, turbidity.

Сахар является важным сырьем для многих отраслей пищевой индустрии. В производстве крепких алкогольных напитков сахар служит одним из главных дополнительных компонентов. В частности, при производстве водочных изделий, среди всех дополнительных ингредиентов наибольшая массовая доля приходится на сахар. Сахар, присутствует в рецептуре большинства водок производимых на российском рынке. Он придает готовому изделию сладость, кроме того способствует округлению и умягчению вкуса водок.

Сахар используется в производстве водки в виде водного раствора. Из литературных источников известно, что некоторые виды сахара могут обладать примесями, которые являются нерастворимыми в спирте [1-3]. Как показывают опыты, при смешивании исходных водных растворов сахара со спиртом в различных концентрациях, некоторые водно-спиртовые растворы действительно проявляют сильную коллоидную опалесценцию. Наличие коллоидных примесей сахара негативно сказывается на качестве готового продукта. В частности наблюдается образование хлопьевидного осадка во время приготовления водки, а также непосредственно хранения водки в бутылке.

Доля сахара, применяемого в рецептурах водочных изделий мала, однако, как показывает практика, является достаточной для образования осадка и забраковки больших объемов готовой продукции. Поэтому проблема применения сахара, который имеет в своем составе спиртонерастворимые примеси, является очень актуальной при производстве алкогольных напитков.

На сегодняшний день главным сырьем в мире для производства сахара является сахарный тростник. Как следствие, большинство мирового сахара произведено из тростникового сахара-сырца. В России сахар производится из сахарной свеклы, однако также в большом количестве импортируется тростниковый сахар-сырец. Свекловичный и тростниковый сахар невозможно отличить без специализированных приборов, поэтому сахар, поступающий в продажу не всегда можно идентифицировать по источнику происхождения. В связи с этим, трудно однозначно судить какой из сахаров в большей или меньшей степени имеет в своем составе спиртонерастворимых примесей.

Проведенные исследования показали, что большинство отечественных образцов сахара-песка, произведенных из сахарной свеклы, не образовывали коллоидных примесей при смешивании исходных сиропов со спиртом, а импортные образцы тростникового сахара давали сильную опалесценцию в водно-спиртовых растворах. Однако, проанализированные образцы отечественного сахара-рафинада, которые соответствовали требованиям ГОСТ 51355-99 для производства водочных изделий,

также как и образцы тростникового сахара, образовывали в большей или меньшей степени спиртонерастворимые коллоиды.

Для определения влияния различных концентраций спирта на коллоидную мутность сахарных сиропов, нами были выбраны 4 образца сахара, содержащие в своем составе примеси, нерастворимые в спирте – это три образца отечественного белого сахара-рафинада, различных наименований и один импортный тростниковый белый сахар. Характеристики анализируемых образцов сахара приведены в таб.1.

Таблица 1

## Характеристика анализируемых сахаров

обр.	Вид сахара	Производитель	Нормативный документ производства	Исходное сырье	Дата производства
	Сахар-рафинад белый кусковой «Петербургская традиция»	ООО «Ленсахар», Россия	ГОСТ 22-94	Сахарная свекла или тростниковый сахар-сырец	2011 год
	Сахар-рафинад белый кусковой "Чайкоффский"	ОАО Сахарный завод «Ника», Россия	ГОСТ Р 53396-09	Сахарная свекла или тростниковый сахар-сырец	15.10.11
	Сахар кусковой прессованный для гипермаркета "Лента"	ООО «Ленсахар», Россия	ГОСТ Р 53396-09	Сахарная свекла или тростниковый сахар-сырец	29.09.12
	Сахар кусковой "Мистраль"	«Tropical Cubes Co», Маврикий	-	Тростниковый сахар-сырец	02.02.12

Для проведения испытаний из каждого образца сахара готовили водные растворы четырех различных массовых концентраций сухих веществ – 30%, 40%, 50% и 60%. Далее отбирали одинаковые объемы каждого приготовленного сиропа и небольшими порциями при интенсивном перемешивании вносили ректифицированный спирт марки «Люкс» крепостью 96,6% об. После каждого внесения спирта измерялась мутность пробы на турбидиметре, откалиброванном в единицах мутности по формазину (ЕМФ). Резкое увеличение мутности в пробах свидетельствовало либо об осаждении спиртонерастворимых компонентов, либо о начале кристаллизации сахарозы, которая также является плохо растворимой в спирте. Результаты экспериментальных исследований представлялись в виде графиков зависимости коэффициента мутности

пробы ( $K$ ) от объемной доли вносимого спирта ( $v$ ) в водно-спиртовом растворе образца. Коэффициент мутности рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{M_t}{M_0} \quad (1),$$

$K$  – коэффициент мутности пробы;  $M_t$  – мутность водно-спиртового раствора образца в определенный момент времени, ЕМФ;  $M_0$  – начальная мутность водного раствора сахара, ЕМФ.

При рассмотрении под микроскопом водно-спиртовых образцов сахара концентраций 30%, 40% и 50% были видны лишь коллоидные частицы примеси, кристаллов сахарозы при этих концентрациях не наблюдалось. Однако, в водно-спиртовых растворах при 60%-ом содержании сахарозы, когда концентрация спирта становилась более 52% об., мутность образцов резко увеличивалась, что свидетельствовало о начале осаждения сахарозы в растворах.

Процесс образования коллоидных примесей начинался при концентрации спирта 38-42% об. в зависимости от процентного содержания сахарозы в растворах. Чем выше концентрация сухих веществ в растворе, тем при более низкой концентрации спирта начинается образование нерастворимых примесей. С увеличением концентрации спирта в растворе мутность образцов постепенно выходила на постоянный уровень, что говорило о полном осаждении спиртонерастворимых коллоидов.

Для математического описания процесса образования коллоидных примесей сахара, нерастворимых в спирте была выполнена обработка практических данных. Первоначальный поиск математической модели процесса выполнялся в программе для нахождения функции по имеющемуся массиву точек *Curve Expert v1.4*. Как оказалось, все найденные уравнения зависимости образования коллоидов в растворах сахаров различных концентраций сухих веществ от объемной доли спирта описываются математической моделью одного типа (*MMF Model*):

$$K_{in} = \frac{a_n \cdot b_n + c_n \cdot v^{d_n}}{b_n + v^{d_n}} \quad (2),$$

– объемная доля этилового спирта;  $n$  – номер образца сахара;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – переменные коэффициенты, характерные для каждого вида сахара и зависящие от концентрации сухих веществ в растворе.

Проанализировав переменные всех полученных уравнений, было выявлено, что значения коэффициентов  $a$  и  $d$  меняются незначительно. Поэтому коэффициенты  $a$  и  $d$  были численно рассчитаны как среднее арифметическое всех полученных значений

данных переменных для всех видов сахаров:  $\bar{a}_{11} = 1; \bar{a}_{13} = 11,13$ . Таким образом, уравнение 2 приняло вид:

$$K_n = \frac{b_n + c_{11} \cdot v^{11,13}}{b_n + v^{11,13}} \quad (3).$$

Для упрощения полученного уравнения поделим числитель и знаменатель на коэффициент  $b$ :

$$K_n = \frac{1 + \frac{c_{11}}{b_n} \cdot v^{11,13}}{1 + \frac{1}{b_n} v^{11,13}} \quad (4).$$

Введем новые коэффициенты, которые будут представлять собой функцию от массовой доли сухих веществ в изначальном водном растворе сахара: — —

Подставим в уравнение 4:

$$K_n = \frac{1 + A_n \cdot v^{11,13}}{1 + B_n \cdot v^{11,13}} \quad (5).$$

$A, B$  – расчетные коэффициенты, зависящие от концентрации сухих веществ в растворе сахара.

Таким образом, для каждого водного раствора сахара различной концентрацией сухих веществ было найдено общее уравнение, количественно описывающее образующиеся спиртонерастворимые частицы.

Из уравнения 5 можно определить граничные точки коэффициента мутности  $K$ . В водном растворе сахара (при  $v=0$ ) коэффициент мутности  $K=1$ , это значит, что  $M_t = M_0$ . В водно-спиртовом растворе сахара, когда объемная доля спирта максимальна (примем  $v=1$ ) коэффициент мутности  $K=(1+A_n)/(1+B_n)$ . Тогда максимальная мутность водно-спиртового раствора сахара будет рассчитываться по формуле:

$$M_{max} = M_t = K_{it} \cdot M_0 = \left( \frac{1 + A_n}{1 + B_n} \right) \cdot M_0 \quad (6).$$

Для нахождения зависимости коэффициентов от концентрации сухих веществ в начальном растворе сахара была использована система компьютерной алгебры

*Mathcad v14*. Формулы для вычисления коэффициентов  $A$  и  $B$  для каждого образца сахара рассчитывались на основании полученных значений мутности водно-спиртовых растворов по четырем массовым долям сухих веществ в растворах ( $C$ ). Полученные уравнения расчета коэффициентов для каждого образца приведены в *таб.2*.

Таблица 2

Формулы для расчета коэффициентов  $A$  и  $B$  анализируемых образцов сахара

№ образца	Коэффициент $A$	Коэффициент $B$
1		
2		
3		
4		

Таким образом, была найдена математическая модель процесса образования спиртонерастворимых коллоидных примесей для различных сахарных сиропов. Графическое изображение модели процесса приводится на *рис.1* (в качестве примера приводятся графики зависимости коэффициента мутности от объемной доли этилового спирта образца сахара №1 для всех исследуемых концентраций).

Порядок значений коэффициентов  $A$  и  $B$  много больше 1, поэтому коэффициент мутности при максимальной концентрации спирта будет определяться отношением:  $K=A/B$ . Уравнение 6 также можно упростить:

$$M_{\text{тmax}} = M_f = K_{\text{тн}} \cdot M_0 = \left( \frac{A_{\text{тн}}}{B_{\text{тн}}} \right) \cdot M_0 \quad (7).$$

С помощью уравнения 7, измерив начальную мутность водного раствора образца сахара, можно количественно рассчитать максимально возможную мутность сахара, возникающую из-за осаждения спиртонерастворимых коллоидов в растворе. Чтобы рассчитать мутность водно-спиртового раствора сахара при любой концентрации спирта, необходимо воспользоваться уравнением 5. Однако, при массовой доле сухих веществ более 0,6 в растворе, формула будет справедлива только при концентрации спирта не более 52% об., так как при больших спиртовых концентрациях помимо



спиртонерастворимых коллоидов будет также осаждаться и сама сахароза, увеличивая мутность в растворе.

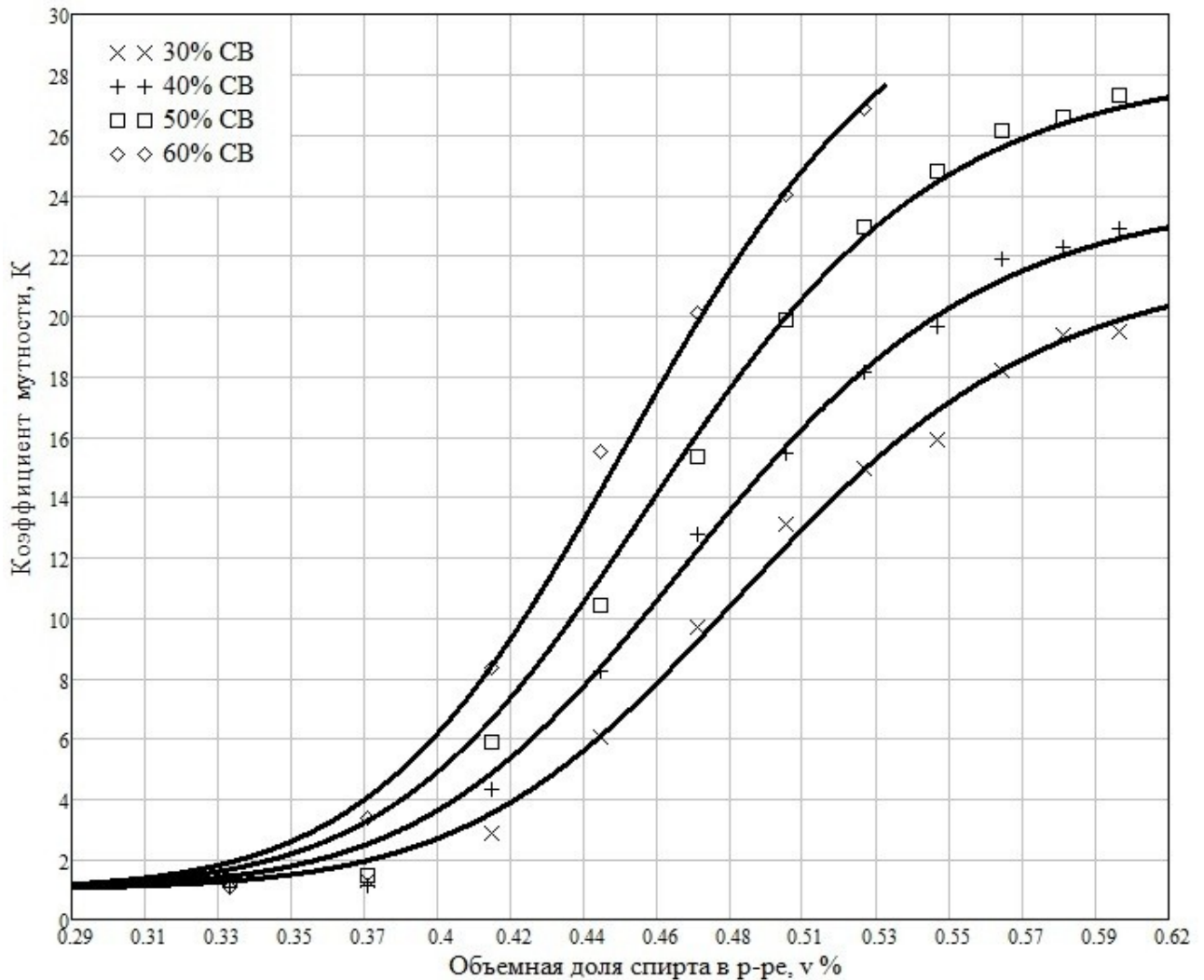


Рис. 1. Графическое изображение модели процесса образования спиртонерастворимых примесей в сахарных сиропах для образца №1

Таким образом, исследования показали, что все три анализируемых сахарафинада отечественного производства, как и импортный тростниковый сахар имели в своем составе большое количество примесей, нерастворимых в спирте. Применение таких сахаров в производстве водки крайне нежелательно, так как различные помутнения являются недопустимыми. Выполнив математическую обработку полученных значений мутности водно-спиртовых растворов сахара, оказалось, что все образцы описываются уравнением одного типа (уравнение 5). Поэтому можно предположить, что примеси всех образцов сахара имеют одинаковую природу, свойственную примесям тростникового сахара.

Отличить по органолептическим признакам свекловичный и тростниковый сахар не представляется возможным. Поэтому необходим комплекс предварительных испытаний, который определит возможность применения данного вида сахара в производстве водочной продукции. Проведенные испытания показали, что сахар, произведенный из тростникового сахара-сырца или с его добавлением, в большинстве случаев обладает спиртонерастворимыми примесями. Применение такого сахара будет способствовать появлению осадка на различных стадиях водочного производства.

Список литературы:

1. Бугаенко И.Ф. Основы сахарного производства. –М.: Международная сахарная компания, 2002. –355с.
2. Бугаенко И.Ф., Чернышева Н.А. Технология производства сахара из сырца. – М.: Союзроссахар, 2002.–290с.
3. Бугаенко И.Ф. Идентификация свекловичного и тростникового сахара. Московский государственный университет пищевых производств//Сахар. 2004. №5. С.39–40.