

К вопросу применения рефрактометрии для мониторинга процесса брожения сусла

Руслан Генрихович Тимофеев, канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр. лаборатории тихих вин, Russ1970@mail.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН», Россия, Республика Крым, 298600, г. Ялта, ул. Кирова, 31

Изучены закономерности изменения показаний сахарной шкалы рефрактометра в процессе спиртового брожения виноградного сусла. Экспериментально установлены эмпирические зависимости между плотностью сусла и показаниями сахарной шкалы рефрактометра в процессе брожения сусла. Установлен практический выход спирта из единицы сахаров для различных фаз брожения. Предложена методика контроля процесса спиртового брожения виноградного сусла, основанная на использовании рефрактометрии.

Ключевые слова: виноделие; методы контроля; денсиметрия; выход спирта.

ORIGINAL RESEARCH

On the use of refractometry to monitor must fermentation processes

Ruslan Genrihovich Timofeev

Federal State Budget Scientific Institution All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking Magarach of RAS, 31 Kirova Street, 298600 Yalta, Republic of Crimea, Russia

Refractometer sugar scale variability patterns have been studied in the process of grape must alcoholic fermentation. Empirical relationships between must density and refractometer sugar scale indications were experimentally established in the process of must fermentation. The isolated alcohol output from a sugar unit was established for various fermentation phases. A refractometry based method to control the grape must alcoholic fermentation process was proposed.

Key words: winemaking; control methods; densimetry; alcohol yield.

Введение. Для определения концентрации сахаров (экстракта) в сусле перед брожением, а также мониторинга снижения их концентрации в процессе спиртового брожения в виноделии используют денсиметрический (ареометрический) метод, основанный на линейной зависимости плотности сусла от концентрации сахаров. Плотность свежавыжатого виноградного сусла до брожения однозначно, с точностью 5 г/дм³, определяет массовую концентрацию сахаров [1, С.26]. В процессе спиртового брожения плотность сусла уменьшается пропорционально количеству выбродивших сахаров. Для оценки концентрации сахаров в процессе брожения денсиметрическим методом необходимо знать исходную плотность сусла до брожения. Зависимость концентрации сахаров (общее

экстракта) от плотности в процессе брожения имеет вид [2]:

$$C = C_0 - \frac{\rho_0 - \rho}{0,453}, \quad (1)$$

где C и C_0 – искомая и начальная концентрация сахаров (экстракта) в сусле, г/дм³, ρ_0 и ρ – начальная и отвечающая искомой сахаристости (экстрактивности) плотность сусла, кг/м³, 0,453 – коэффициент, показывающий снижение плотности сусла при сбраживании 1 г/дм³ сахаров, соответственно.

Если при измерении плотности исходного сусла особых трудностей не возникает, то в процессе брожения сусло в значительной степени насыщено углекислотой, что обуславливает ряд проблем связанных с точным определением его плотности, а именно, наличие пузырьков газа в жидкой фазе, а так же адсорбция пузырьков газа на поверхности ареометра обуславливают кажущееся снижение плотности жидкости. Обильное пенообразование, наличие взвесей и дрожжевых клеток делают картину еще более неопределенной в силу влияния этих факторов. Для нивелирования этого эффекта можно проводить частичную дегазацию образца перед определением плотности, удалять пузырьки газа путем вращения ареометра, использовать ареометры больших типоразмеров, что усложняет оперативный мониторинг процесса брожения. Одним из недостатков денсиметрического метода также является необходимость использования большого объема (порядка 250 мл) образца, что не всегда возможно при контроле процесса в малом объеме, в частности в исследовательских целях.

Альтернативой денсиметрическому методу определения концентрации сахаров в сусле до брожения является рефрактометрический метод [1, С.27], который позволяет проводить определение концентрации сахаров в пробе объемом порядка 0,1 мл. Исследования возможностей рефрактометрии для мониторинга процесса брожения сусла было изучено А.С. Вечером еще в 1958 году [3], однако, несмотря на довольно подробные проведенные исследования, данная проблема далека до полного разрешения в плане практического применения в энохимической практике.

Согласно представлениям, заложенным в основу рефрактометрических методов анализа, в идеальных системах (образующихся без из-

Как цитировать эту статью:

Тимофеев Р.Г. К вопросу применения рефрактометрии для мониторинга процесса брожения сусла // «Магарач». Виноградарство и виноделие. 2019; 21(3). С.267-271. DOI 10.35547/IM.2019.21.3.015

How to cite this article:

Timofeev R.G. On the use of refractometry to monitor must fermentation processes. *Magarach. Vinogradarstvo i vinodelie*=Magarach. Viticulture and Winemaking. 2019; 21(3):267-271. DOI 10.35547/IM.2019.21.3.015 (in Russian)

УДК 663.253.1: 543.45

Поступила 01.08.2019

Принята к публикации 20.08.2019

©Тимофеев Р.Г., 2019

менения объема и поляризуемости компонентов) зависимость показателя преломления n смеси от состава близка к прямолинейной, если состав выражен в объемных долях (процентах) [4]. Данный факт заложен в основу рефрактометрических методов определения сухих веществ в продуктах переработки плодов и овощей [5], а также, наряду с денсиметрическим методом, для оценки массовой концентрации экстракта и сахаров в виноградном сусле до брожения [6]. Рефрактометрию также применяют для определения объемной доли этилового спирта в водно-спиртовых растворах [7, 8], где показатель преломления водно-спиртовой смеси однозначно определяет концентрацию этанола в диапазоне от 0 до 50 % об.

Объем, который занимает единица массы большинства растворимых веществ в растворе, в частности, вещества экстракта виноградного сусла, не зависит от его концентрации, что объясняет линейный характер зависимости плотности растворов от их концентрации. В случае растворов этилового спирта объем, который он занимает в растворе, зависит от его концентрации нелинейно, что выражается в том, что функция плотности водно-спиртовых растворов также имеет нелинейный характер.

В процессе спиртового брожения сусла происходит уменьшение концентрации редуцирующих сахаров и увеличение концентрации этилового спирта. Из одной молекулы гексозы образуются две молекулы этилового спирта и две молекулы углекислоты. Учитывая молекулярные массы гексоз и этилового спирта, из 1 г сахаров теоретически можно получить 0,5114 г ($0,6479 \text{ см}^3$) чистого этанола. Реальный выход этанола ниже в силу влияния различных факторов, основными из которых являются образование побочных продуктов брожения, унос спирта с углекислотой, использование части сахаров в процессе накопления дрожжами биомассы, так что величина $0,6 \text{ см}^3$ образовавшегося спирта из 1,0 г сахаров, используемая в технологических расчетах [2, 9], является величиной скорее нормативной, чем отражающей реальный выход спирта в каждый текущий момент времени. Если рассматривать процесс упрощенно, то можно предположить, что на каждую единицу снижения концентрации редуцирующих сахаров сусла образуется определенный объем спирта, что должно, теоретически, приводить к линейному изменению показателя преломления сусла в процессе брожения пропорционально количеству выбродивших сахаров.

Целью настоящей работы является установление закономерностей изменения показаний сахарной шкалы рефрактометра в процессе брожения виноградного сусла и разработка метода контроля процесса брожения по изменению показаний сахарной шкалы рефрактометра.

Объекты и методы исследований

В качестве материала для исследования были использованы образцы сусла винограда сорта

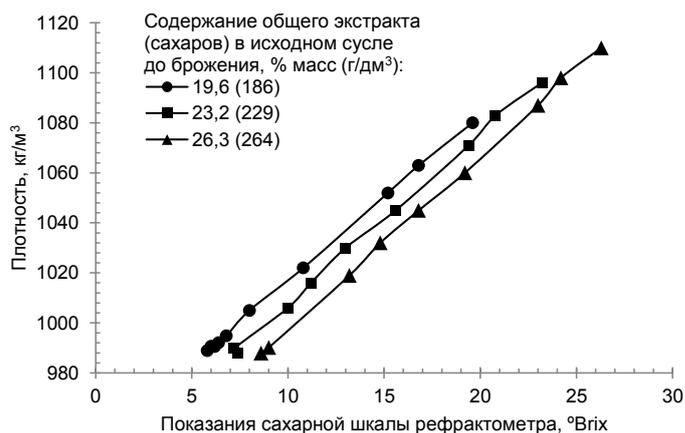


Рис. 1. Связь между плотностью сусла и показаниями сахарной шкалы рефрактометра в процессе спиртового брожения для разной начальной сахаристости сусла

Fig. 1. The relationship between grape must density and readings of the refractometer sugar scale in the process of alcoholic fermentation for different initial sugar content in the must

Шабаш и Мускат белый урожая 2018 года с массовой концентрацией сахаров от 150 г/дм^3 до 300 г/дм^3 . Всего 8 образцов сусла. Брожение образцов проводили используя расу 47-К.

Методика исследований заключалась в следующем. В сульфитированном до 75 мг/дм^3 осветленном сусле определяли массовую концентрацию сахаров, плотность, а также массовую долю сухих веществ в пересчете на сахарозу рефрактометрически. Далее в сусло вносили разводку чистой культуры дрожжей и после появления признаков брожения производили контроль процесса брожения с периодичностью 2-3 суток по следующим показателям:

- плотность – ареометрическим методом;
- массовую концентрацию сахаров – методом Бертрана по ГОСТ 13192-73 [10];
- объемную долю этилового спирта – методом отгона по ГОСТ 32095-2013 [11];
- показатель преломления по сахарной шкале рефрактометра УРА-2 при температуре $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что в процессе спиртового брожения происходит снижение показаний сахарной шкалы рефрактометра пропорционально снижению его плотности (рис. 1).

Результат обработки данных эксперимента дал следующую эмпирическую формулу для выражения зависимости между этими величинами:

$$\rho = (0,0342 \times B_0 + 6,049) \times B + 969,72 + 0,66 \times B_0 - 0,086 \times B_0^2, \quad (2)$$

где ρ – плотность сусла, кг/м^3 ; B_0 – начальное (до брожения) показание сахарной шкалы рефрактометра, B – показание сахарной шкалы рефрактометра в процессе брожения.

При $B = B_0$ получаем выражение для плотности сусла (кг/м^3) до начала спиртового брожения исходя из показаний сахарной шкалы рефрактометра:

$$\rho_0 = 969,72 + 6,709 \times B_0 - 0,05158 \times B_0^2, \quad (3)$$

тогда для массовой концентрации экстракта до брожения, г/дм^3 можно записать следующее выражение:

$$\varrho_0 = \frac{\rho_0 \times 10 \times V_0}{1000} = \frac{969,72 \times V_0 + 6,709 \times V_0^2 - 0,05158 \times V_0^3}{100}. \quad (4)$$

Данные выражения (2-4) для плотности и концентрации экстракта определены для V_0 в диапазоне (10 – 30) °Brix.

Таким образом, зная показания сахарной шкалы рефрактометра до начала брожения и, следовательно, содержание сахаров в исходном сусле, например, используя специальные таблицы, приведенные в [1, 6], а также плотность сусла до и в процессе брожения, вычисленные по формулам (3) и (2), соответственно, можно контролировать содержание сахаров по показаниям сахарной шкалы рефрактометра используя формулу (1). Следует отметить, что при измерении показателя преломления образец сусла следует профильтровать через шприцевой фильтр, так как наличие посторонних включений (взвеси, дрожжевые клетки) в сусле приводит к тому, что под действием силы тяжести они оседают на призме рефрактометра и делают нечеткой границу между светом и тенью при снятии показаний. Можно обойтись без предварительной фильтрации образца, но в этом случае призму рефрактометра, если это технически возможно, следует повернуть так, чтобы посторонние частицы не оседали на ней под действием силы тяжести.

На основании данных эксперимента были вычислены значения коэффициента выхода спирта из единицы сахаров $\text{см}^3/\text{г}$, в зависимости от степени выбраживания сусла и начальной сахаристости сусла. Эти данные представлены на рис. 2.

На первом этапе брожения коэффициент выхода спирта возрастает до определенного локального максимума, затем происходит некоторое его снижение, а затем снова возрастает в конце брожения. Данная кривая изменения коэффициента выхода спирта является накопительной характеристикой, т.к. суммирует выход, который был получен на предыдущих стадиях процесса брожения. Для достижения величины 0,6 и выше (см. например, кривую с начальной концентрацией сахаров 260

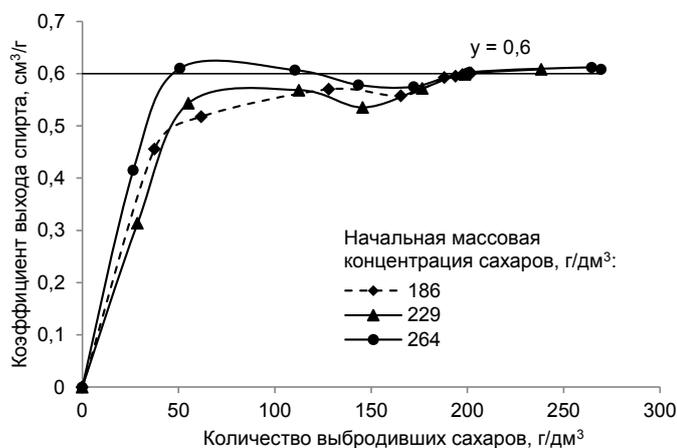


Рис. 2. Изменение коэффициента выхода спирта из единицы сахаров в зависимости от количества выбраживших сахаров для сусла с различной начальной массовой концентрацией сахаров

Fig. 2. The change in the alcohol yield ratio on a unit of sugars depending on the amount of fermented sugars for the must with a varied initial sugar mass concentration

Таблица 1. Зависимость коэффициента выхода спирта от количества выбраживших сахаров для виноградного сусла с начальной массовой концентрацией сахаров 160 – 270 г/дм³

Table 1. The dependence of the alcohol yield ratio on the amount of fermented sugars for grape must with an initial mass concentration of sugars 160 – 270 g/dm³

Количество выбраженных сахаров, г/дм ³	Коэффициент выхода спирта $\text{см}^3/\text{г}$	
	среднее значение	доверительный интервал
30	0,4	$\pm 0,12$
50	0,54	$\pm 0,1$
80	0,58	$\pm 0,04$
150	0,56	$\pm 0,03$
200 и выше	0,6	$\pm 0,01$

г/дм³) при количестве выбраживших сахаров 50-100 г/дм³, скорость продукции этанола на отрезке от 30-50 г/дм³ должна значительно превышать скорость ассимиляции сахаров, и накопление этанола вызвано потреблением накопленных дрожжевыми клетками метаболитов, что подтверждает теорию стадийности биохимических процессов в клетке. Анализ экспериментальных данных также показал, что, несмотря на значительно меньшее количество образовавшегося спирта на первом этапе брожения, снижение плотности, было пропорционально снижению массовой концентрации сахаров, определенных по ГОСТ 13192-73 с таким же инкрементом, что и в середине и в конце брожения, что свидетельствует о том, что характер образующихся продуктов брожения на этапе разбраживания и накопления биомассы дрожжей несколько иной, чем в середине и конце брожения, и эти продукты брожения не вносят вклад в изменение плотности отгона при определении объемной доли этилового спирта по ГОСТ 32095-2013.

Среднее значение и 95%-ный доверительный интервал для выхода спирта из единицы массы сахаров в процессе спиртового брожения осветленного сусла расой 47К, полученный на основании обработки экспериментальных данных, приведен в табл. 1.

В технологии виноградных вин может возникнуть потребность вычислить показания сахарной шкалы рефрактометра, при достижении определенной массовой концентрации сахаров, например, с целью приготовления вин с прерванным процессом спиртового брожения (столовые полусухие, полуладкие, а также ликерные вина).

Анализ структуры формулы (2) показал, что ее можно представить в виде линейной функции вида

$$\rho = K(V_0) \times V + L(V_0), \quad (5)$$

т.е. при заданном начальном значении V_0 , зависимость плотности от показаний сахарной шкалы рефрактометра имеет линейный характер. С другой стороны, существует линейная зависимость между снижением плотности сусла при брожении и массовой концентрацией выбраживших сахаров согласно формуле (1). Исходя из этого можно записать

$$\frac{\rho - \rho_0}{0,453} = \frac{B_0 - B}{X} \quad (6)$$

где x – изменение показаний сахарной шкалы рефрактометра при снижении массовой концентрации сахаров на 1 г/дм³.

Тогда для массовой концентрации сахаров (экстракта) в процессе брожения можно записать:

$$C = C_0 - \frac{B_0 - B}{X(B_0)} = C_0 - (B_0 - B) \times \frac{1}{X(B_0)} \quad (7)$$

где C и C_0 – массовая концентрация сахаров (экстракта) в процессе брожения и до брожения, соответственно, г/дм³; B_0 и B – показания сахарной шкалы рефрактометра до и в процессе брожения, ° Brix; $1/X(B_0)$ – коэффициент пропорциональности между снижением массовой концентрации сахаров и изменением показаний сахарной шкалы рефрактометра.

Вычисленные для разных значений B_0 величины C_0 , $\alpha(B_0) = 1/X(B_0)$ приведены в табл. 2.

Продемонстрируем полученные закономерности для технологических расчетов.

Пример. Исходные показания сахарной шкалы для сусла составили 25,2° Brix (25,2% масс.). После остановки брожения холодом и фильтрацией показания сахарной шкалы составили 10° Brix. Определить концентрацию общего экстракта и сахаров до брожения, после остановки брожения и количество образовавшегося этанола.

Определяем концентрацию экстракта Θ_0 до брожения по формуле (4)

$$\Theta_0 = \frac{969,72 \times 25,2 + 6,709 \times 25,2^2 - 0,05158 \times 25,2^3}{100} \cong 278,7 \text{ г/дм}^3$$

Массовую концентрацию сахаров в сусле до брожения определяем из табл. 2, что составит 252 г/дм³.

Концентрацию общего экстракта и сахаров определим из формулы (7), которая для нашего случая, при $\alpha = 15,56$ (табл. 2), имеет вид:

для массовой концентрации экстракта

$$\Theta = 278,7 - (25,2 - 10) \times 15,56 = 278,7 - 236,5 \cong 42,2 \text{ г/дм}^3$$

и массовой концентрации сахаров

$$C = 252 - (25,2 - 10) \times 15,56 = 252 - 236,5 \cong 15,5 \text{ г/дм}^3.$$

Концентрация спирта, соответственно, с учетом варибельности коэффициента выхода спирта из единицы сахаров, составит:

$$(C_0 - C) \times 0,6 = (252 - 15,5) \times (0,06 + 0,001) = (14,2 + 0,3) \% \text{ об.}$$

Выводы

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что снижение показаний сахарной шкалы рефрактометра при спиртовом брожении виноградного сусла пропорционально количеству выброженных редуцирующих сахаров, определенных по ГОСТ 13192-73, с инкрементом, который зависит от начального содержания экстрактивных веществ до брожения, и для контроля содержания общего экстракта и массовой концентрации сахаров в процессе спиртового брожения возможно использование показаний сахарной шкалы рефрак-

Таблица 2. Зависимость исходной массовой концентрации сахаров в сусле - C_0 и значение коэффициента $\alpha(B_0)$ от исходной массовой доли сухих веществ в сусле B_0

Table 2. The dependence of the initial mass concentration of sugars in the grape must C_0 and the value of the coefficient $\alpha(B_0)$ on the initial mass fraction of dry substances in the grape must B_0

B_0	C_0	α	B_0	C_0	α	B_0	C_0	α
10,0	82	14,16	16,8	155	14,76	23,6	233	15,41
10,2	84	14,17	17,0	158	14,78	23,8	235	15,43
10,4	86	14,19	17,2	160	14,80	24,0	238	15,44
10,6	88	14,21	17,4	162	14,81	24,2	240	15,46
10,8	90	14,23	17,6	164	14,83	24,4	242	15,48
11,0	92	14,24	17,8	167	14,85	24,6	245	15,50
11,2	94	14,26	18,0	169	14,87	24,8	247	15,52
11,4	97	14,28	18,2	171	14,89	25,0	249	15,54
11,6	99	14,29	18,4	173	14,91	25,2	252	15,56
11,8	101	14,31	18,6	176	14,93	25,4	254	15,58
12,0	103	14,33	18,8	178	14,94	25,6	256	15,60
12,2	105	14,35	19,0	180	14,96	25,8	259	15,62
12,4	107	14,36	19,2	182	14,98	26,0	261	15,64
12,6	109	14,38	19,4	185	15,00	26,2	263	15,66
12,8	112	14,40	19,6	187	15,02	26,4	266	15,68
13,0	114	14,42	19,8	189	15,04	26,6	268	15,71
13,2	116	14,43	20,0	192	15,06	26,8	270	15,73
13,4	118	14,45	20,2	194	15,08	27,0	273	15,75
13,6	120	14,47	20,4	196	15,10	27,2	275	15,77
13,8	122	14,49	20,6	198	15,11	27,4	277	15,79
14,0	125	14,51	20,8	201	15,13	27,6	280	15,81
14,2	127	14,52	21,0	203	15,15	27,8	282	15,83
14,4	129	14,54	21,2	205	15,17	28,0	284	15,85
14,6	131	14,56	21,4	208	15,19	28,2	287	15,87
14,8	133	14,58	21,6	210	15,21	28,4	289	15,89
15,0	135	14,59	21,8	212	15,23	28,6	292	15,91
15,2	138	14,61	22,0	215	15,25	28,8	294	15,93
15,4	140	14,63	22,2	217	15,27	29,0	296	15,95
15,6	142	14,65	22,4	219	15,29	29,2	299	15,97
15,8	144	14,67	22,6	221	15,31	29,4	301	15,99
16,0	147	14,69	22,8	224	15,33	29,6	303	16,01
16,2	149	14,70	23,0	226	15,35	29,8	306	16,03
16,4	151	14,72	23,2	228	15,37	30,0	308	16,06
16,6	153	14,74	23,4	231	15,39	-	-	-

тометра до и в процессе брожения, как альтернативы денсиметрическому методу.

Источник финансирования

Не указан.

Financing source

Not specified.

Конфликт интересов

Не заявлен.

Conflict of interests

Not declared.

Список литературы/ References

1. Методы технокимического и микробиологического контроля в виноделии / Под ред. Гержиковой В. Г. – Симферополь: Таврида. – 2002. – 259 с.
[Methods of techno-chemical and microbiological control in winemaking / Ed. Gerzhikova V.G. Simferopol: Tavrida. 2002. 259 p. (in Russian)].
2. Русаков В.А. Расчет купажей: учебное пособие. – К.: УМК ВО, 1989. – 147 с.
[Rusakov V.A. *Raschet kupazhey: uchebnoe posobie* [Wine blend calculation - manual]. K.: UMK VO. 1989. – 147 p. (in Russian)].
3. Вечер А.С. К применению прецизионной рефрактометрии в виноделии // Труды Краснодарского института пищевой промышленности, вып.18, 1958. – С.176-196.
[Vecher A.S. *K primeneniyu pretsizionnoy refraktometrii v vinodelii* [Revisiting precision refractometry in winemaking]. *Trudyi Krasnodarskogo instituta pischevoy promyshlennosti*. Vol.18. 1958. pp.176-196 (in Russian)].
4. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1983. – 352 с.
[Ioffe B.V. *Refractometric methods of chemistry*. 3rd ed., Rev. Leningrad: Chemistry. 1983. 352 p. (in Russian)].
5. ГОСТ 28562-90 Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ. – М.: Стандартинформ. 2005. – 10 с.
[GOST 28562-90 Fruit and vegetable products. Refractometric method for determination of soluble solids content. Moscow: Standartinform. 2005. 10 p. (in Russian)].
6. ГОСТ 27198-87 Виноград свежий. Методы определения массовой концентрации сахаров. – М.: ИПК Издательство стандартов. 2000. – 8 с.
[GOST 27198-87 Fresh grapes. Methods for determination of mass concentration of sugars. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov. 2000. 8 p. (in Russian)].
7. Сливкин А.И., Селеменов В.Ф., Суховерхова Е.А. Физико-химические и биологические методы оценки качества лекарственных средств. Учеб. пособие / Под ред. В. Г. Артюхова, А. И. Сливкина. – Воронеж: ВГУ, 1999. – 368 с.
[Slivkin A.I., Selemenev V.F., Suhoverhova E.A. *Physico-chemical and biological methods for assessing the quality of medicines. Study guide* / Ed. V. G. Artyukhova, A. I. Slivkina. Voronezh: VSU. 1999. 368 p. (in Russian)].
8. Березина Е.С., Киселева А.А., Филиппова Ю.В. Рефрактометрическое определение концентрации спирта в лекарственных формах // Вестник Пермской государственной фармацевтической академии. – №2. – 2007. – С.123-125.
[Berezina E.S., Kiseleva A.A., Filippova Yu.V. *Refractometric determination of the concentration of alcohol in dosage forms. Vestnik Permskoy gosudarstvennoj farmacevticheskoy akademii* [Bulletin of the Perm State Pharmaceutical Academy]. №2. 2007. pp. 123-125 (in Russian)].
9. Сборник основных правил, технологических инструкций и нормативных материалов по производству винодельческой продукции. Под ред. Сарисвили Н.Г. – Москва: Пищепромиздат, 1998. – 244 с.
[*Sbornik osnovnyih pravil, tehnologicheskikh instruktsiy i normativnyih materialov po proizvodstvu vinodelcheskoy produktsii*. Pod red. Sarishvili N.G [Collection of fundamental principles, progress guidelines and standards on wine production]. Moskva: Pischepromizdat. 1998. 244 p. (in Russian)].
10. ГОСТ 13192-73 Вина, виноматериалы и коньяки. Метод определения сахаров. – М.: Стандартинформ. 2011. – 10 с.
[GOST 13192-73 Wines, wine materials and cognacs. Method of sugar determination. Moscow: Standartinform. 2011. 10 p. (in Russian)].
11. ГОСТ 32095-2013 Продукция алкогольная и сырье для ее производства. Метод определения объемной доли этилового спирта – М.: Стандартинформ. 2014. – 6 с.
[GOST 32095-2013 The alcohol production and raw material for it producing. Method of ethyl alcohol determination. Moscow: Standartinform. 2014. 6 p. (in Russian)].

ORCID ID:Тимофеев П.Г. <https://orcid.org/0000-0002-6105-944X>