

Рассеяние света

Выполнили:

Аленович Анастасия Александровна (11А),
Мартинкевич Илья Валерьевич (11А)

Научный руководитель:

Матюк Анатолий Эдуардович, учитель
физики СШ №1 г. Лиды

Оглавление

Введение.....	2
Основная часть	5
Заключение	10
Литература	10

Введение

По условию задачи, необходимо сконструировать прибор, способный измерять концентрацию нерастворимых веществ в коллоидных растворах, и использовать его для определения жирности молока.

Слово «молочный» всегда было синонимом слова «мутный»: молоко тумана, молочное стекло и т. д. Мутная среда — это среда, непрозрачная для света не за счет поглощения (как, например, лист металла), а за счет рассеяния. Мутность молока обусловлена в основном наличием жира, который содержится в виде огромного количества шариков, диаметр которых колеблется от 0,5 до 10 мкм. Чем жирнее молоко, тем больше в нем жировых шариков, тем менее оно прозрачно. Значит, измеряя прозрачность молока, можно определить его жирность.

Рассмотрим параллельный пучок света с длиной волны λ , падающий на собирающую линзу (рис. 1). Линза соберет весь пучок в фокусе. Правда, из-за дифракции на экране, установленном в фокальной плоскости, будет наблюдаться яркое пятнышко конечного размера и менее яркие кольца вокруг него. Однако при очень большом диаметре пучка (и, соответственно, линзы) всей этой структурой можно пренебречь и считать, что в идеале линза собирает всю световую энергию Φ , которую несет пучок, в бесконечно малом фокальном пятне.

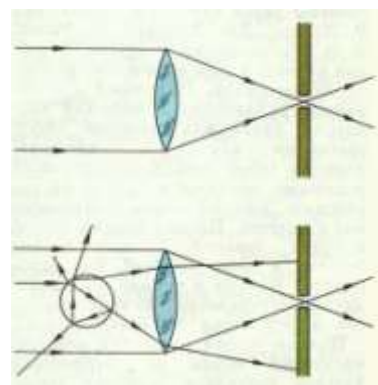


Рис. 1

Внесем теперь в пучок прозрачную сферическую частицу с радиусом r . Часть пучка взаимодействует с частицей: отразится от поверхности, преломится внутри и т. д. Лучи из этой части пучка уже не сохранят первоначального направления и либо совсем уйдут в сторону, либо, пройдя линзу, попадут в фокальную плоскость, но не в фокус. В результате полная световая энергия, собирающаяся в фокусе, уменьшится на $\Delta\Phi$. На первый взгляд представляется очевидным, что световая энергия, унесенная рассеянной частью пучка, равна

$$\Delta\Phi' = E_0 S, \quad (1)$$

где E_0 — освещенность единичной площадки в падающем пучке, а $S = \pi r^2$ — площадь контура частицы. Однако мы увидим, что в действительности все

обстоит не так просто, и полная световая энергия, рассеиваемая частицей, отличается от $\Delta\Phi'$.

Для характеристики рассеивающих свойств частицы мы воспользуемся безразмерной величиной

$$Q = \Delta\Phi / \Delta\Phi', \quad (2)$$

где $\Delta\Phi$ — энергия, «теряющаяся» в результате рассеяния. Отыскание зависимостей Q от r и от λ и изучение распределения рассеянного излучения в пространстве — это основная задача теории рассеяния. Вся картина рассеяния определяется не длиной волны и радиусом частицы в отдельности, а соотношением между ними. Другими словами, безразмерная величина Q должна зависеть от безразмерной комбинации r и λ , а именно — от параметра $\delta = r/\lambda$. Если размер частиц бесконечно мал по сравнению с длиной волны ($\delta \rightarrow 0$), то нет смысла говорить о световых лучах, которые попадают на частицу и рассеиваются ею. Волна просто «не замечает» частицу, $\Delta\Phi \rightarrow 0$ и $Q \rightarrow 0$.

Обратимся к случаю, когда частица бесконечно большая по сравнению с длиной волны ($\delta \rightarrow \infty$). Представляется очевидным, что рассеянные лучи — это те лучи, которые попадают в контур частицы. Так что $\Delta\Phi = \Delta\Phi' = E_0 S$, и, казалось бы, $Q = 1$. Однако волновые свойства света проявляются и здесь. На контуре частицы всегда происходит дифракция. Лучи света, претерпевшего дифракцию, распространяются вперед, по ходу падающих лучей, но все же слегка отклоняются от своего первоначального направления. А раз так, то лучи уже не соберутся в фокальном пятне. И при этом оказывается, что энергия, которую уносят эти лучи, в точности равна $\Delta\Phi'$! Так возникает удвоение количества рассеянной световой энергии:

$$\Delta\Phi = 2\Delta\Phi', \text{ и } Q = 2.$$

Обратим внимание на то, что бесконечно большая (по сравнению с λ) частица, в отличие от бесконечно малой, рассеивает свет в окружающее пространство уже не равномерно: ведь в одном только направленном вперед дифракционном «языке» оказывается заключенной половина $\Delta\Phi$.

Теперь опишем процесс прохождения параллельного светового пучка через тонкий слой молока. Пусть молоко налито в кювету и свет падает на стенку кюветы перпендикулярно. Удобно представить себе, что жировые шарики расположены в молоке слоями, параллельными стенками кюветы (рис.2). Каждая частица в первом слое рассеет световую энергию $\Delta\Phi_1$. Согласно (1) и (2),

$$\Delta\Phi_1 = QSE_0 = Q\pi r^2 E_0$$

(r — средний радиус частиц). Рассеянные лучи уходят в разные стороны, и освещенность, создаваемая первоначальным пучком, после прохождения светом первого слоя частиц падает от

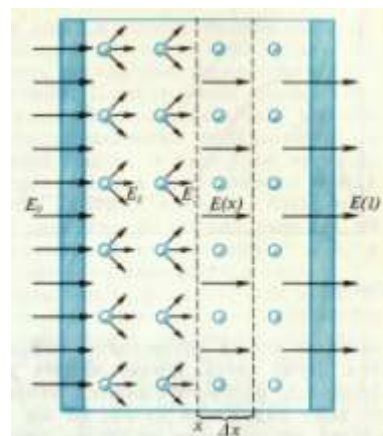


Рис. 2

E_0 до $E_1 < E_0$. Поэтому каждая частица во втором слое рассеет световую энергию

$$\Delta\Phi_2 = QSE = Q\pi r^2 E_1 .$$

И так далее. Наша задача – найти освещенность, создаваемую параллельным пучком на выходе из кюветы. Для этого рассмотрим внутри кюветы слой молока толщиной Δx . Пусть освещенность в месте расположения этого слоя $E(x)$. Изменение освещенности в слое определяется энергией, рассеиваемой всеми частицами этого слоя, и если в единице объема имеется N шариков жира, то

$$\Delta E = -Q\pi r^2 E(x) \cdot N \cdot \Delta x.$$

Отсюда при $\Delta x \rightarrow 0$ перейдем к дифференциальному уравнению:

$$E' = -Q\pi r^2 N E(x).$$

Дифференциальное уравнение вида

$$y'(x) = ay(x)$$

имеет своим решением экспоненциальную функцию

$$y(x) = ce^{ax} .$$

Применительно к нашему случаю получаем, что на выходе из кюветы длиной l параллельный пучок света будет создавать освещенность

$$E(l) = E_0 e^{-Q\pi r^2 N l} .$$

Реальные приборы построены так, что измеряется не освещенность, а величина

$$D = -\ln (E(l)/E_0) ,$$

называемая оптической плотностью:

$$D = -\ln \frac{E(l)}{E_0} = Q\pi r^2 N l.$$

Преобразуем эту формулу следующим образом:

$$D = \frac{Q \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 N l}{\frac{4}{3} r} = \frac{Q V l K \frac{1}{\lambda}}{\frac{4}{3} K r \frac{1}{\lambda}} = \frac{Q}{X} \frac{3}{4 \lambda} K l V. \quad (3)$$

Здесь $V = \frac{4}{3} \pi r^3 N$ – суммарный объем жировых шариков в единице объема молока. А $V \cdot 100\%$ и есть процентное содержание жира в молоке.

Итак, D пропорционально V . Значит, измеряя оптическую плотность, можно вычислить жирность молока. Но увы! Точность определения V будет низкой. Как видно из выражения (3), в коэффициент пропорциональности между D и V входит функция $z = Q/X$. В натуральном молоке, независимо от содержания жира, средний радиус жировых частиц может быть разным - от 0,5 до 1,5 мкм. При $K=1,5$ величина X (для видимого света) может меняться, соответственно, от примерно 1 до 3. Чтобы избежать ее, перед измерением производят стандартизацию размеров жировых шариков в пробе молока. Прибор снабжается гомогенизатором – устройством, в котором молоко продавливается через систему клапанов, где жировые шарики дробятся и приводятся все к среднему размеру примерно 0,5 мкм. Тем самым достигается однозначная зависимость между D и V . Гомогенизацию молока, кстати, часто проводят и на молокозаводах. Такое молоко более устойчиво к расслаиванию, к скисанию и лучше усваивается.

Основная часть

Исходя из данной теории, мы можем предложить два метода определения жирности молока.

Первый метод фотометрический основан на регистрации фотоприемником света, прошедшего через кювету с молоком.

Второй метод основан на измерении диаметра лазерного луча, прошедшего через ту же кювету с молоком.

Остановимся на каждом методе подробнее. Для



Рис. 4. Прибор для изучения зависимости тока фотоэлемента от освещенности

проведения опытов мы сделали кювету из плоскопараллельных стеклянных пластинок. Размеры кюветы: 3 см × 2,5 см × 2 мм. Таким образом, толщина слоя молока в кювете составляла 2 мм.

Фотоприемником света, прошедшего через кювету с молоком, служил селеновый фотоэлемент, подключенный к микроамперметру (прибор типа ТЛ-4) с пределом измерения 100 мкА.

Селеновый фотоэлемент расположен в левой части горизонтальной

пластмассовой трубы, закрытой с торцов и укрепленной на двух подставках. Средняя часть трубы раскрывается на две

половины. Труба прибора внутри имеет несколько защитных ребер и черную матовую окраску. Ребра предохраняют фотоэлемент от отраженных лучей, а



Рис. 6. Установка для определения жирности молока фотометрическим методом



Рис. 3. Кювета с пробой молока



Рис. 5. Кювета с пробой молока освещается источником света

черная окраска – от световых бликов.

Кювета освещалась лампочкой 3,5 В, 0,26 А. Лампочка питалась от источника постоянного тока ЛИП90.

В кювету наливали поочередно молоко с различной массовой долей жира: 1%, 1,8%, 2%, 2,5%, 3,2%, 3,3%, 4%, 6% и сливки 10% жирности. Свет, проходящий через слой молока, частично рассеивался жировыми

шариками, и на фотоприемник попадал только прошедший через кювету свет. Соответственно, чем больше жирность молока, тем сильнее рассеивается свет, тем меньше попадает света на фотоприемник и тем меньше показания микроамперметра.

Таким образом, зная заранее жирность молока и соответствующие показания микроамперметра, можно проградуировать наш прибор и с помощью его определять жирность различных проб молока (естественно в тех пределах, которые мы исследовали).

Результаты приведены в таблице 1 и на графике 1.

Табл. 1. Зависимость тока фотоэлемента от жирности молока.

Жирность молока, %		1%	1,8%	2%	2,5%	3,2%
Показания микроамперметра, <i>мкА</i>	Повторные измерения	56	54	53	49	47
		57	55	54	48	48
		56	54	52	49	47
	Среднее значение	56,3	54,3	53,0	48,7	47,3

Жирность молока, %		3,3%	4%	6%	10%	?% (3,7%)
Показания микроамперметра, <i>мкА</i>	Повторные измерения	47	46	41	35	47
		46	45	40	34	46
		47	44	40	32	45
	Среднее значение	46,7	45,0	40,3	33,7	46,0

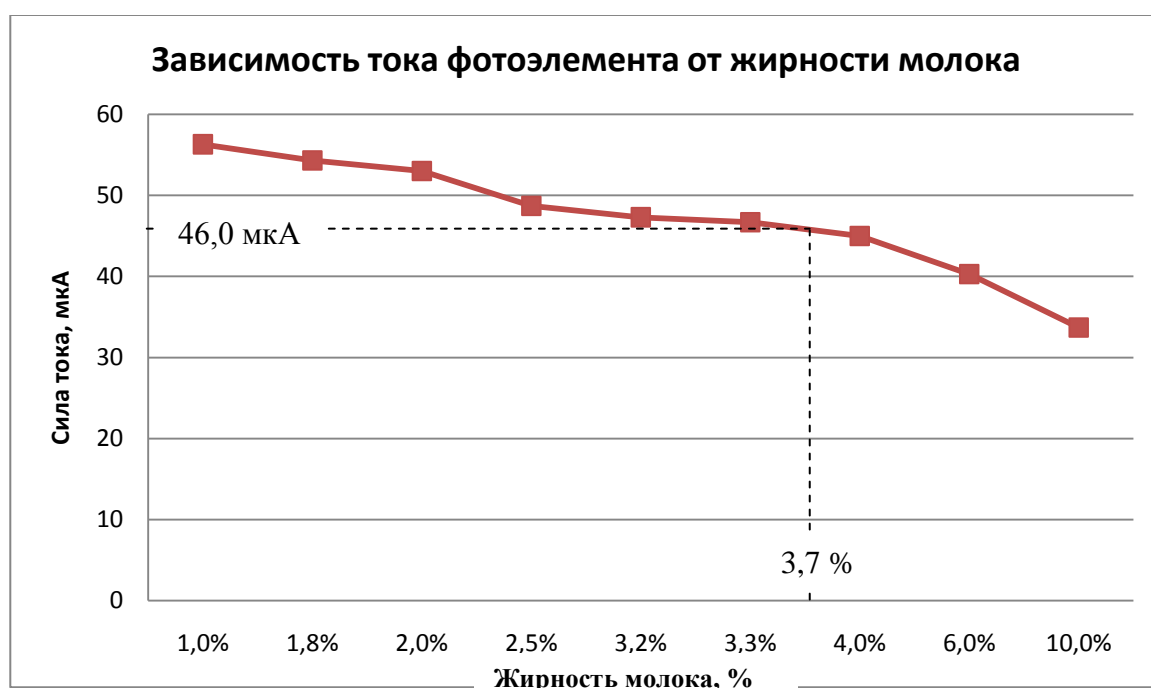


График 1. Зависимость тока фотоэлемента от жирности молока

Для проверки нашего прибора мы взяли пробу деревенского молока неизвестной жирности. Для гомогенизации деревенского молока мы его подогрели до температуры, близкой к температуре кипения. В результате рассеяния света микроамперметр показал силу тока 46 мкА, что соответствует приблизительно 3,7% жирности.

Для определения жирности молока вторым методом использовалась та же кювета, в которую также поочередно наливали молоко с различной массовой долей жира: 1%, 1,8%, 2%, 2,5%, 3,2%, 3,3%, 4%, 6% и сливки 10% жирности. Кювету освещали лазерным лучом и измеряли диаметр луча, прошедшего через слой молока. Чем больше жирность молока, тем сильнее рассеивается свет от лазерного пучка и тем самым увеличивается угол расходимости и диаметр данного лазерного луча на выходе из кюветы.



Рис. 7. Определение диаметра лазерного луча после прохождения через слой молока (He-Ne лазер)



Рис. 8. Определение диаметра лазерного луча после прохождения через слой молока (полупроводниковый лазер)

В работе использовались два лазера: гелий-неоновый газовый лазер ЛГН-109 и полупроводниковая лазерная указка.

Результаты приведены в таблицах 2, 3 и на графиках 2, 3.

Табл. 2. Зависимость диаметра лазерного луча от жирности молока (He-Ne лазер).

He-Ne лазер	Исходный диаметр луча, мм	Жирность молока, %	1%	1,8%	2%	2,5%	3,2%
Повторные измерения	1,0	Диаметр лазерного луча на выходе из кюветы, мм	3,1	3,4	3,5	3,7	4,0
	1,1		3,0	3,3	3,4	3,8	3,9
	1,1		2,9	3,4	3,4	3,8	4,1
	0,9		3,1	3,5	3,6	3,6	4,0
	1,2		3,0	3,5	3,5	3,7	4,1
Среднее значение	1,06		3,02	3,42	3,48	3,72	4,02

He-Ne лазер	Исходный диаметр луча, мм	Жирность молока, %	3,3%	4%	6%	10%	?% (3,7%)
Повторные измерения	1,0	Диаметр лазерного луча на выходе из кюветы, мм	4,0	4,3	4,5	5,3	4,2
	1,1		4,1	4,2	4,6	5,0	4,3
	1,1		4,1	4,4	4,5	5,1	4,2
	0,9		4,0	4,3	4,6	5,0	4,1
	1,2		4,1	4,4	4,6	5,2	4,2
Среднее значение	1,06		4,06	4,32	4,56	5,12	4,20

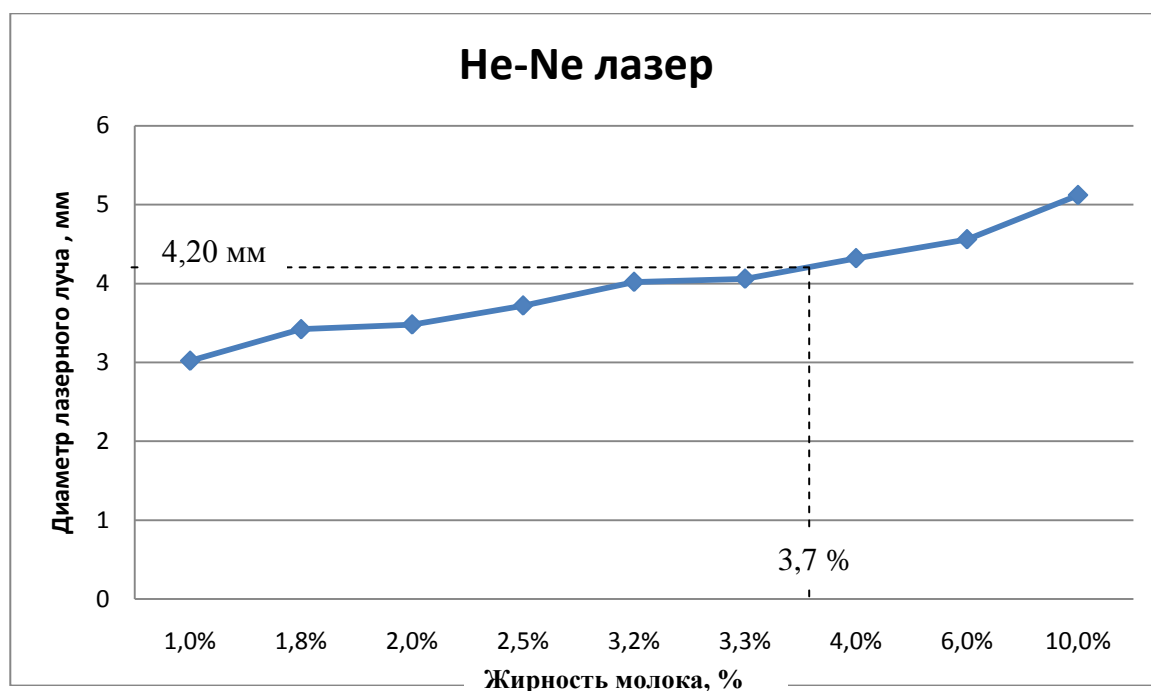


График 2. Зависимость диаметра лазерного луча от жирности молока (He-Ne лазер).

Табл. 3. Зависимость диаметра лазерного луча от жирности молока (полупроводниковый лазер).

Полупроводниковый лазер	Исходный диаметр луча, мм	Жирность молока, %	1%	1,8%	2%	2,5%	3,2%
Повторные измерения	3,1	Диаметр лазерного луча на выходе из кюветы, мм	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7
	3,1		4,0	4,2	4,1	4,6	4,8
	3,0		3,9	4,2	4,3	4,5	4,9
	3,2		4,1	4,3	4,2	4,4	4,8
	3,2		3,9	4,1	4,3	4,4	5,0
Среднее значение	3,12		3,98	4,18	4,24	4,48	4,84

Полупроводниковый лазер	Исходный диаметр луча, мм	Жирность молока, %	3,3%	4%	6%	10%	?% (3,7%)
Повторные измерения	3,1	Диаметр лазерного луча на выходе из кюветы, мм	4,8	5,0	5,2	5,8	4,9
	3,1		4,9	5,1	5,1	5,6	5,0
	3,0		4,8	5,0	5,1	5,6	5,0
	3,2		5,0	5,1	5,0	5,8	4,9
	3,2		4,9	5,0	5,2	5,9	5,0
Среднее значение	3,12		4,88	5,04	5,12	5,74	4,96

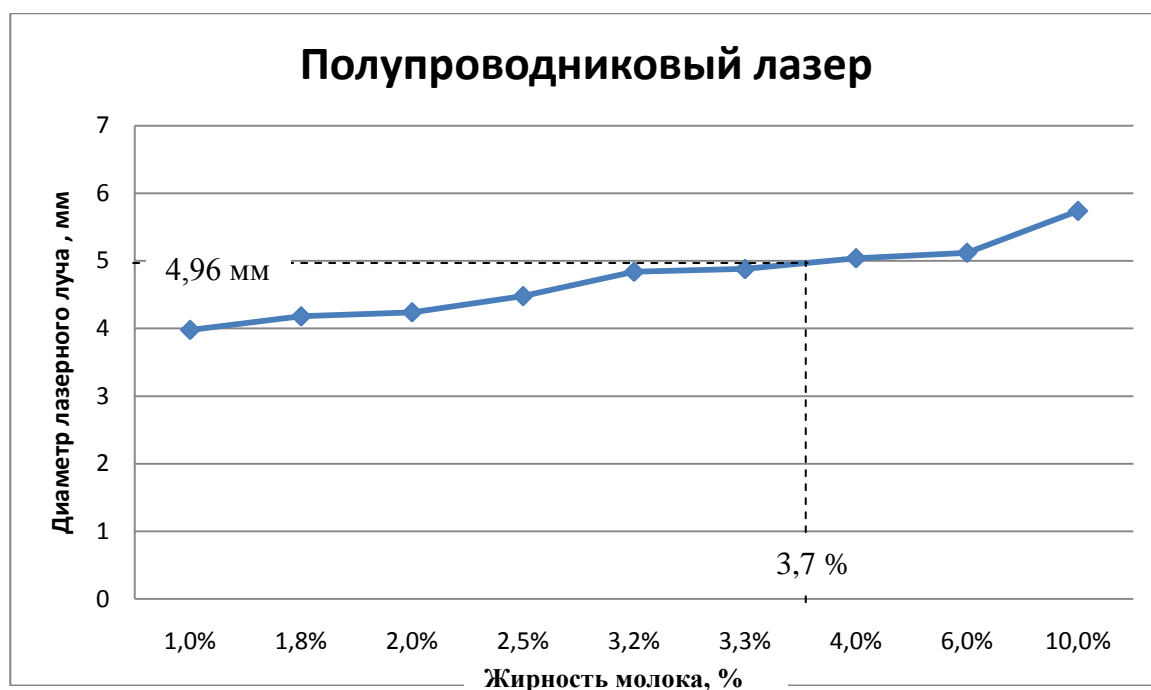


График 3. Зависимость диаметра лазерного луча от жирности молока (полупроводниковый лазер).

Для проверки второго метода определения жирности молока мы взяли ту же пробу деревенского гомогенизированного молока неизвестной жирности. В результате прохождения лазерного луча гелий-неонового лазера через кювету с молоком средний диаметр луча на выходе оказался 4,20 мм, что соответствует приблизительно 3,7% жирности. Средний диаметр луча полупроводникового лазера после прохождения через кювету с деревенским молоком оказался 4,96 мм, что также приблизительно соответствует 3,7% жирности.

Заключение

Таким образом, в ходе решения задачи нами был изучен механизм рассеяния света на нерастворимых сферических частицах в коллоидных растворах, а также разработаны два метода определения жирности молока и сконструированы соответствующие приборы для их реализации.

Первый метод, фотометрический, основан на улавливании фотоприемником света, прошедшего через кювету с молоком и требует наличия светочувствительного прибора – фотоэлемента, подключенного к микроамперметру.

Второй метод проще, но и погрешность при определении жирности молока может быть больше, по сравнению с первым методом. Он основан на измерении диаметра лазерного луча, прошедшего через кювету с молоком и рассеянного жировыми шариками. При этом можно применять те лазеры, которые имеются в вашем распоряжении (главное чтобы излучение было видимым и значительно рассеивалось частицами жира).

И первым и вторым методом можно определить жирность молока в пределах градуировки прибора с точностью до 0,1%.

Нам кажется, что описанные методы определения жирности молока являются достаточно простыми, по сравнению с химическими методами, которые применяются в лабораториях, и их может применить любой желающий для определения жирности молока в домашних условиях.

Литература

1. Измерение содержания жира в молоке.
<http://uran.donetsk.ua/~masters/2004/kita/romaschenko/library/kol3.htm>.
2. О рассеянии, или как измерить жирность молока. А.А Кремер // Квант. – 1988- №8 – С. 9 – 13.
3. Понятие о коллоидных растворах.
<http://www.himhelp.ru/section24/section12/section73/>.