

УДК 621.446

В. С. Гуцин

Донецкий национальный технический университет  
83050, г. Донецк, пр. Богдана Хмельницкого, 84

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ САХАРНОГО СИРОПА ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

V. S. Gushin

Donetsk National Technical University  
83050, c. Donetsk, Bogdana Khmel'nitskogo av.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT DEVICE FOR MEASURING SUGAR SYRUP DENSITY BY HYDROSTATIC METHOD

В. С. Гуцин

Донецький національний технічний університет  
83050, м. Донецьк, пр. Богдана Хмельницького, 84

## ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЦУКРОВОГО СИРОПУ ГІДРОСТАТИЧНИМ МЕТОДОМ

Показано, что для изменения концентрации сахарного сиропа в условиях производства карамельной массы рационально использовать электронное устройство на основе гидростатического плотномера. Выполнен анализ структуры и оценено соотношение составляющих погрешностей косвенного определения концентрации карамельного сиропа по результатам измерения его температуры и плотности гидростатическим методом.

**Ключевые слова:** гидростатический плотномер, концентрация  
и плотность сахарного сиропа, карамельный сироп.

The article shows that in order to change the sugar syrup concentration in production of caramel mass, it is rational to use an electronic device based on a hydrostatic density meter. The analysis of the structure is performed and the ratio of the error components of the indirect determination of the caramel syrup concentration is estimated from the results of measuring its temperature and density by the hydrostatic method.

**Key words:** hydrostatic densitometer, concentration and density of sugar syrup,  
caramel syrup.

Показано, що для зміни концентрації цукрового сиропу в умовах виробництва карамельної маси раціонально використовувати електронний пристрій на основі гідростатичного плотномера. Виконано аналіз структури і оцінено співвідношення складових похибок непрямого визначення концентрації карамельного сиропу за результатами вимірювання його температури і щільності гідростатичним методом.

**Ключові слова:** гідростатичний плотномер, концентрація  
і щільність цукрового сиропу, карамельний сироп.

## Общая постановка проблемы

Плотномер является измерительным прибором, который служит для измерения плотности газов, жидкостей, твердых веществ. Для выбора соответствующего плотнoмера рассматриваются основные метрологические, а также эксплуатационные характеристики, к ним относятся: точность, воспроизводимость, пределы измерения, их погрешности и диапазон, температуры действия и давления, определение взаимодействия конструкционных материалов и исследуемых веществ. Стандартной температурой считается 0 °С, такая температура позволяет произвести измерения при помощи плотнoмера. Относительная плотность разнообразных веществ при этой температуре позволяет составлять таблицы (или номограммы), которые заносятся в справочную литературу и принимаются как основа исследований.

Работа гидростатического плотнoмера основана на принципе линейной зависимости гидростатического давления относительно высоты уровня и плотности жидкости. Измерение столба жидкости происходит непосредственно при косвенном способе – производится продувание воздуха сквозь жидкость. Давление такого воздуха пропорционально столбу жидкости. Отношение плотности двух веществ при определенных стандартных физических условиях называется относительной плотностью; для жидких и твердых веществ ее измеряют при температуре  $T$ , как правило, по отношению к плотности дистиллированной воды при 40°С, для газов – по отношению к плотности сухого воздуха или водорода при нормальных условиях ( $T= 273,15$  К,  $P=1,01\cdot 10^5$  Па).

При росте температуры плотность вещества обычно уменьшается, а с увеличением давления увеличивается. При переходе с агрегатного состояния в другое, плотность уменьшается скачкообразно. Единицей плотности в Международной системе единиц служит ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) на практике применяют также следующие единицы:  $\text{г}/\text{см}^3$ ,  $\text{г}/\text{л}$ ,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Совокупность методов измерения плотности жидкостей и твердых тел называется денсиметрией (происходит от лат. «Densus» – плотность (густой) и греческого «Metron» – измерять). Денсиметрия – это совокупность методов измерения относительной плотности жидких и твердых тел. В лабораторной практике распространены методы, основаны на законе Архимеда: относительную плотность определяют по глубине погружения ареометра в исследуемую жидкость или за результатами взвешивания жидкости или твердого тела на гидростатических весах. Относительную плотность можно измерить пикнометром с высокой точностью для этого, взвешивать сначала пустой пикнометр, потом заполненный дистиллированной водой и, наконец, – исследуемой жидкостью; значения плотности получают из отношения массы исследуемой жидкости к массе воды.

**Цель работы** – анализ структуры устройства измерения плотности сиропа гидрoметодом.

## Решение задачи, результаты исследований

Работа устройства измерения плотности основана на измерении разности давлений в растворе и преобразования его в пропорциональный электрический сигнал. Схема измерения плотности сахарного сиропа в производстве карамельной массы представлена на рис. 1. Процедура измерения следующая:

– с помощью двух трубок разной длины и преобразователя разности давлений осуществляется измерение перепада давления «Р», обусловленного разностью уров-

ней  $h=h_1-h_2$ . Для обеспечения возможности измерения разности давлений осуществляется прокачка (барботирование) воздуха в раствор через эти трубки под небольшим избыточным давлением от микропроцессора АЭН – 4;

– перепад давления «Р» и плотность раствора « $\rho$ » связаны между собой зависимостью:

$$P=h \cdot g \cdot \rho = k \cdot \rho,$$

где  $k=h \cdot g = \text{const}$ ;  $h = \text{const}$  – база измерения;  $g$  – ускорения свободного падения.

Таким образом, выходной сигнал преобразователя разности давлений пропорционален значению плотности раствора;

– выходные сигналы преобразователя разности давлений и устройство измерения температуры поступают в устройство обработки, регистрации и визуализации информации (ВУ), где рассчитывается в реальном масштабе времени процентное содержание сухих веществ по сахарозе. В ВУ осуществляется линейная аппроксимация табличной зависимости плотности сахарных растворов от процентного содержания сухих по сахарозе и температуры.

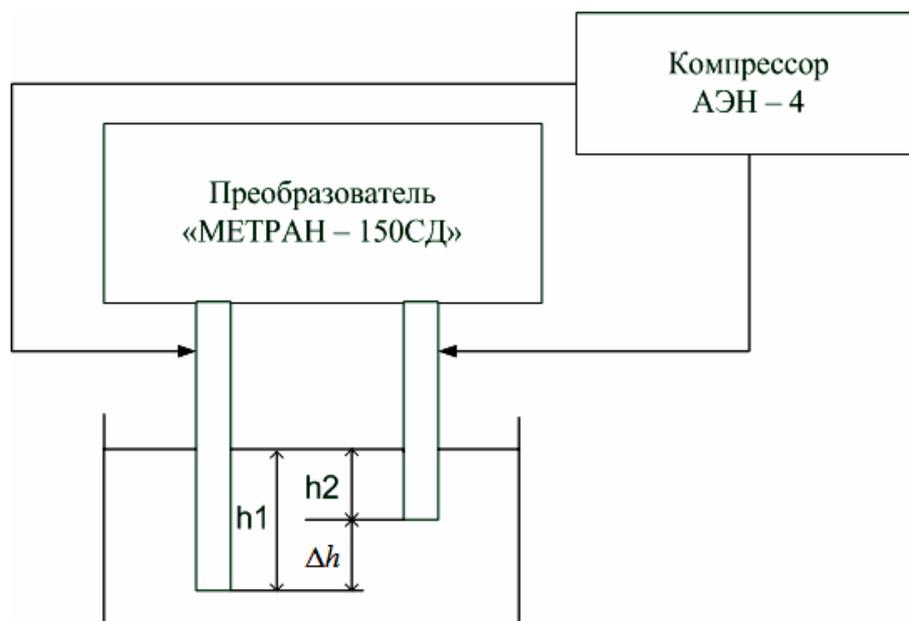


Рисунок 1 – Схема измерения плотности сахарного сиропа в производстве карамельной массы

Полагаем, что при изменении концентрации сахарного раствора, используемого в карамельном производстве, и его температуры плотность раствора изменяется в диапазоне от  $1,3 \text{ г/см}^3$  до  $1,5 \text{ г/см}^3$  [1], [2]:

Представим текущую плотность раствора « $\rho$ » в виде:

$$\rho = \rho_{\min} + \Delta\rho.$$

Тогда разность давлений «Р» можно записать:

$$P = (\rho_{\min} + \Delta\rho) \cdot g \cdot h = \rho_{\min} \cdot g \cdot h + \Delta\rho \cdot g \cdot h = P_{\min} + \Delta P,$$

где  $P_{\min} = \rho_{\min} \cdot g \cdot h$  – минимальная разность давлений в схеме измерения;

$\Delta P = \Delta \rho \cdot g \cdot h$  – изменение разности давлений в схеме измерения, обусловленное изменением плотности раствора.

Пусть  $\Delta \rho = \rho_{\max} - \rho_{\min} = (1,5 - 1,3) \text{ г/см}^3 = 0,20 \text{ г/см}^3$ ,  $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  $h = 0,1 \text{ м}$ .

Тогда

$$\Delta P = \Delta \rho \cdot g \cdot h = 0,20 \text{ г/см}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 0,1 \text{ м} = 2000 \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}^2} = 200 \text{ Па};$$

$$P_{\max} = \rho_{\max} \cdot g \cdot h = 1,5 \text{ г/см}^3 \cdot 10 \text{ м/с}^2 \cdot 0,1 \text{ м} = 15000 \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}^2} = 1500 \text{ Па} = 1,5 \text{ кПа}.$$

Для измерения разности давлений (перепада давлений)  $P_{\max}$  следует использовать стандартный измеритель разности давлений (Метран 150СД) с верхним пределом измерения 1,6 кПа. Наиболее точный преобразователь этого типа имеет предел допускаемой приведенной погрешности  $\gamma_p = \pm 0,1\%$ , т.е. предельное значение абсолютной погрешности измерения разности давлений равно:

$$\Delta_p = \frac{1,6 \text{ кПа} \cdot (\pm 0,1\%)}{100\%} = \pm 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ кПа} = \pm 1,6 \text{ Па}.$$

Таким образом, при изменении плотности раствора на  $0,200 \text{ г/см}^3$  разность давлений будет изменяться на 200 Па, если  $h = 0,1 \text{ м}$ . Измерение этой разности давлений можно выполнить с погрешностью  $\pm 1,6 \text{ Па}$  с помощью ИПРД типа Метран 150СД исполнения «1».

Для оценки погрешности измерения плотности в данной схеме полагаем, что значения  $g$  и  $h$  известны с высокой точностью. Тогда можно определить погрешность измерения плотности, если известна погрешность измерения разности давлений  $\Delta_p = \pm 1,6 \text{ Па}$ :

$$\Delta_\rho = \frac{\Delta_p}{g \cdot h} = \frac{\pm 1,6 \text{ Па}}{10 \text{ м/с}^2 \cdot 0,1 \text{ м}} = \pm 0,0016 \text{ г/см}^3.$$

где  $g$  – ускорения свободного падения.

Таким образом, погрешность измерения плотности в диапазоне  $(1,3 \dots 1,5) \text{ г/см}^3$  не превышает  $\pm 0,0016 \text{ г/см}^3$ , при  $g = 10 \text{ м/с}^2$  и  $h = 0,1 \text{ м}$ , которые известны с высокой точностью.

Оценим погрешность измерения концентрации «С» сахарного раствора косвенным методом: по результатам измерения температуры «Т» и плотности «ρ» сахарного раствора. Уравнение косвенного измерения в символическом виде можно записать

$$C = f(T, \rho),$$

где  $f$  – функционал зависимости между  $C$ ,  $T$  и  $\rho$ .

Согласно [2], [3] погрешность косвенно определяемой величины может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta_C(p) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial T} \cdot \Delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \rho} \cdot \Delta_\rho\right)^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta_C(p)$  – доверительная граница погрешности косвенно измеряемой величины «С» (концентрации) при доверительной вероятности «Р»;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью Р (k=1,1 при P=0,95);

$\Delta_T, \Delta_\rho$  – погрешности прямых измерений температуры «Т» и плотности « $\rho$ », соответственно.

Согласно рекомендациям [3] в качестве погрешностей  $\Delta_T$  и  $\Delta_\rho$  в выражении (1) можно принять погрешности прямых измерений, полагая другие составляющие (например, методическую) пренебрежимо малыми.

Таким образом, для определения погрешности  $\Delta_C$  прежде всего необходимо оценить погрешности прямых измерений  $\Delta_T$  и  $\Delta_\rho$ .

Приняв  $\Delta_T = \pm 1^\circ\text{C}$  и полагая  $\Delta_\rho = \pm 0,0016 \text{ г/см}^3$ , определим погрешность измерения концентрации, используя (1). Частные производные  $\frac{\partial C}{\partial T}$  и  $\frac{\partial C}{\partial \rho}$  определяем, используя табулированные зависимости  $\rho = f(C, T)$ , приведенные в [2]:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \left. \frac{\Delta C}{\Delta T} \right|_{\rho = \text{const}} = \left. \frac{70\% - 65\%}{95^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}} \right|_{\rho = 1,305} = 0,1 (\%/^\circ\text{C});$$

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = \left. \frac{\Delta C}{\Delta \rho} \right|_{T = \text{const}} = \left. \frac{70\% - 65\%}{1,334 - 1,302} \right|_{T = 100} = 150 \left( \frac{\%}{\text{г/см}^3} \right);$$

$$\Delta_C = 1,1 \cdot \sqrt{(0,1 \cdot 1)^2 + (150 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3})^2} = 0,29 (\%) = 0,29 (\text{ед. конц.}).$$

Таким образом, можно измерить концентрацию сахарного раствора с погрешностью  $\pm 0,29\%$ , что не превышает погрешность рефрактометра РПЛ-3, который применяют для измерения концентрации сахарного раствора в лабораториях карамельных производств.

## Выводы

1. Выполнена оценка погрешности измерения концентрации «С» сахарного сиропа косвенным методом по результатам измерения температуры «Т» и плотности « $\rho$ » и погрешности измерения плотности сахарного сиропа гидростатическим плотномером. Установлено, что при базе измерения  $h=0,1$  м значение абсолютной погрешности измерения разности давлений в диапазоне (1,3...1,5) кПа не превышает  $\pm 1,6$  Па при использовании наиболее точного стандартного ИПРД с минимальным верхним пределом измерения 1,6 кПа. При этом погрешность измерения плотности сахарного сиропа в диапазоне (1,3...1,5) г/см<sup>3</sup> не превышает  $\pm 0,0016$  г/см<sup>3</sup>, а доверительная погрешность (P=0,95) определения концентрации сиропа в диапазоне температур (100...150) °С равна 0,29% (ед. конц.) и не превышает погрешность лабораторного рефрактометра РПЛ-3.

2. Предложено выполнить канал измерения плотности раствора сахара на основе серийного измерительного преобразователя разности давлений типа «Метран – 150СД».

3. Установлено на основе анализа структуры инструментальной погрешности устройства измерения концентрации сахарного сиропа, что гидростатический плотномер и устройство измерения температуры сиропа вносят примерно одинаковый вклад в погрешность измерения концентрации сиропа. Поэтому для уменьшения этой погрешности в дальнейшем следует позаботиться о способах повышения точности и плотномера, и устройства измерения температуры сиропа.

## Список литературы

1. Лурье И. С. Руководство по технологическому контролю в кондитерском производстве [Текст] / Лурье И. С. – М.: Пищевая промышленность. – 1978. – 278 с.
2. Антопольская М. Я. Справочник по сырью, полуфабрикатам и готовым изделиям кондитерского производства [Текст] / М. Я. Антопольская, И. Н. Бронштейн. – М.: Пищевая промышленность, 1964.
3. Бурдун Г. Д. Основы метрологии [Текст] / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. – М.: Изд. стандартов, 1985. – 256с.

## References

1. Lurie I. S. *Rukovodstvo po technologicheskomu kontrolju v konditerskom proizvodstve* [Manual for Process Control of Confection]. Moscow, Pischevaya Promyshlennist', 1978. 278 p.
2. Antopolskaya M.Ya., Bronshteyn I.N. *Spravochnik po syriu, polufabrikatam i gotovym izdeliim konditerskogo proizvodstva* [Manual for Primary, Intermediate and Finished products of Confection]. Moscow, Pischevaya Promyshlennist', 1964.
3. Burdun H.D., Markov B.N. *Osnovy metrologii* [Metrology Theory]. Moscow, Izd. Standartov, 1985. 256 p.

## RESUME

V. S. Gushin

*Research and Development of an Intelligent Device for Measuring Sugar Syrup Density by Hydrostatic Method.*

**Background:** Density is a physical quantity determined for a homogeneous substance by its mass per unit volume. The ratio of the density of two substances under certain standard physical conditions is called the relative density. For liquid and solid substances, it is measured at a temperature T, usually in proportion to the density of distilled water at 40°C, for gases - relative to the density of dry air or hydrogen under normal conditions ( $T=273,15$  K,  $P=1,01 \cdot 10^5$  Pa).

As the temperature rises, the density of matter usually decreases, but increases with increasing pressure. When the transition from an aggregate state to another, the density decreases abruptly. The unit of density in the International System of Units is (kg/m<sup>3</sup>); in practice, the following units are also used: g/cm<sup>3</sup>, g/l, t/m<sup>3</sup>.

**Materials and methods.** A set of methods for measuring the density of liquids and solids is called densitometry (derived from the Latin "Densus" - density (dense) and Greek "Metron" - to measure). Densimetry is a combination of methods for measuring the relative density of fluid and solid bodies. In laboratory practice, the most widespread methods are

based on the Archimedes' principle: the relative density is determined by the depth of immersion of the hydrometer into the liquid under study or by the results of weighting a fluid or solid body on hydrostatic scales. The relative density can be measured by a pycnometer with high accuracy, when we first weigh an empty pycnometer, then filled with distilled water one and, finally, a pycnometer with the liquid under study. The density values are obtained from the ratio of the mass of liquid to the mass of water.

**Results:** The error in measuring the concentration "C" of sugar syrup by an indirect method was estimated by the results of measuring the temperature "T", and density "ρ", and the error in measuring the density of sugar syrup by a hydrostatic densitometer. It is determined that with the measurement base  $h = 0.1$  m the value of the absolute error of measuring the pressure difference in the range (1.3 ... 1.5) kPa does not exceed  $\pm 1.6$  Pa when using the most accurate standard IRPD with a minimum upper limit of 1.6 kPa. In this case, the error in measuring the density of sugar syrup in the range (1.3 ... 1.5) g/cm<sup>3</sup> does not exceed  $\pm 0,0016$  g/cm<sup>3</sup>, and the confidence error ( $P = 0.95$ ) for determining the syrup concentration in the temperature range (100 ... 150) is 0.29% (Units of conc.), and it does not exceed the error of the laboratory refractometer RPL-3.

**Conclusion:** 1. A channel for measuring the density of the sugar solution on the basis of a serial transducer of the pressure difference of the type "Metran-150SD" is proposed.

2. The analysis of the instrumental error structure of the sugar syrup concentration measuring device determines that the hydrostatic density meter and the syrup temperature measuring device have approximately the same contributions to the syrup concentration measurement error. Therefore, in order to reduce this error in the future, we should take care of improving the accuracy of both densitometer and the device for measuring the temperature of the syrup.

Статья поступила в редакцию 09.02.2017.