

НАЗВАНИЕ:

Документ #FP7

**ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ САХАРНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



Автор: Ульрих Клюте

**BERTHOLD TECHNOLOGIES GmbH & Co KG**  
**Calmbacher Str. 22**  
**75323 Bad Wildbad**  
**Germany**

Тел.: +49 7081 177-0  
Факс: +49 7081 177-100

industry@Berthold.com  
www.Berthold.com

## Введение

В настоящее время содержание сухого вещества в сахарном сиропе и в кристаллизационной суспензии может быть измерено в режиме реального времени с использованием наиболее совершенной микроволновой технологии. Определение зависимости между содержанием воды и сухого вещества позволяет осуществлять аккуратный контроль концентрации, концентрации Brix и плотности во всех областях сахарного производства. Таким образом, обеспечивается непрерывность измерения в течение всего процесса кристаллизации, как на стадии раствора, так и на стадии утфеля.

В настоящем докладе описаны факторы, влияющие на микроволновое измерение, принципы обработки сигнала и показаны преимущества повышения качества контроля технологического процесса.

Предложены решения измерительной системы Micro-Polar Brix для типовых проблемных аспектов применения, таких как образование глазури, абразивный износ, зависимость от доброкачественности и распознавание пауз между циклами процесса кристаллизации.

Представлены результаты, полученные от установок на различных процессах и применениях.

Дополнительно к точному и надежному измерению на всех продуктах из сахарной свеклы или сахарного тростника, особую ценность имеет простота и нетребовательность к обслуживанию и простая калибрация для гарантированной оптимизации качества контроля процесса и расходов. Приведено описание функции автоматической калибровки без необходимости в дополнительном компьютере.

**Ключевые слова:** Brix, сухое вещество, плотность, сахарный тростник, микроволновой, кристаллизация

---

### 1. Введение

Точное определение содержания сухого вещества (концентрация Brix) и/или плотности имеет высокую важность на различных процессах производства сахара. Микроволновая технология предлагает эффективное решение для всех этих измерительных задач. В зависимости от типа процесса, зонд должен отвечать определенным требованиям. Например, на процессах непрерывной кристаллизации для обеспечения достоверного результата измерения в течение продолжительного времени зонд должен иметь функцию промывки. Непрерывного измерения содержания сухого вещества требуется в течение всего процесса кристаллизации. Точное измерение требуется как на стадии раствора до точки посева, так и на стадии утфеля до выгрузки продукта. Такое измерение не может быть обеспечено использованием в технологии рефрактометров, поскольку при этом измерение на стадии кристаллизации будет невозможным.

При производстве сахара существуют другие технологические этапы, где определение содержания сухого вещества имеет существенное значение. Эти этапы включают измерение содержания сухого вещества в диффузионном соке, очищенном соке перед выпариванием и сиропе. Для этих применений поставляются специальные трубопроводные зонды. Далее, микроволновая технология позволяет точно определить концентрацию твердого вещества, например в известковом молоке, или влажность кристаллического сахара.

Микроволновые системы были представлены ранее (Клюте, 2006). В настоящем докладе описываются вопросы обработки сигнала и внедрение таких систем с описанием прямых преимуществ для пользователя.

## 2. Параметры микроволн

### 2.1 Факторы, влияющие на микроволновое излучение

Использование микроволновой техники для определения содержания сухого вещества становится все более распространенным во всем мире. Но что такое микроволны? Микроволны являются электромагнитными волнами, схожими с используемыми в радиопередатчиках, беспроводных сетях, мобильных телефонах и микроволновых печах. Микроволны, используемые во всех этих применениях, различаются частотным диапазоном и мощностью. Частота микроволнового излучения, используемого в измерительных системах в сахарной промышленности, обычно составляет около 2.5 ГГц при невысокой мощности. В Таблице 1 приведено сравнение микроволновых излучений для различных применений.

**Таблица 1** – Мощность СВЧ-излучения для различных применений

Микроволновая печь	1000 Вт
Мобильный телефон	2 Вт
Micro-Polar Brix	0.0001 Вт

Понятие “микроволны” объясняет себя само. В микроволновом измерительном приборе, микроволны от передатчика проходят сквозь продукт как волны, и регистрируются приемником. Если передатчик и приемник образуют единую сборку, принцип действия этих устройств может быть резонанс, рассеивание или отражение микроволнового излучения. Если передатчик и приемник разделены, измерение основано на прохождении волн через продукт. Именно эта технология используется фирмой Berthold, поскольку данная технология обычно обеспечивает большую репрезентативность результатов измерения, в силу существенно большего количества продукта, вовлеченного в процесс измерения.

При прохождении микроволнового излучения через продукт, различные компоненты продукта поляризуются в различной степени, что приводит к потере микроволновым излучением скорости и энергии. Снижение скорости характеризуется сдвигом фазы сигнала, снижение энергии влияет на затухание микроволн (см. Рис. 1). Если в продукте есть носители свободных зарядов или поляризованные вещества, такие как молекулы воды, эффект возрастает. Влияние воды на сигнал приблизительно в 40 раз выше, чем влияние других компонентов, таких как сахар. Из этого очевидно, насколько высока избирательная чувствительность измерения к концентрации воды. Зависимость между содержанием воды и сухим веществом позволяет очень точно определить концентрацию, brix и плотность на всех этапах производства сахара.

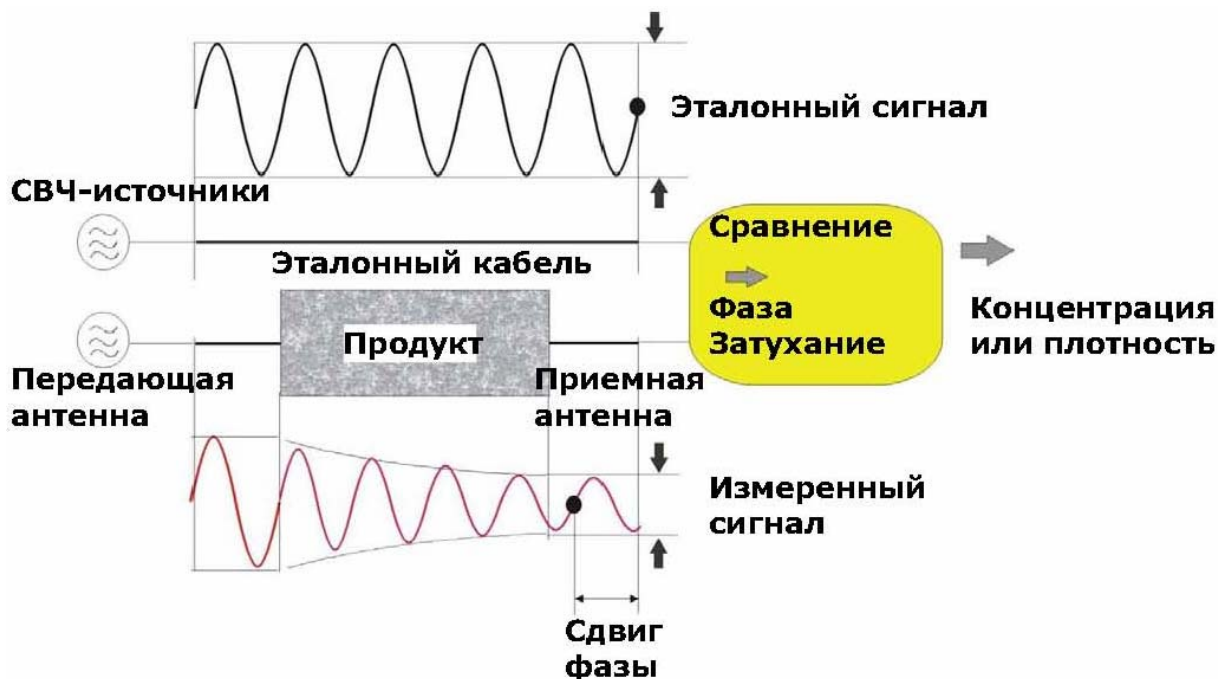


Рис. 1:  
Принцип измерения

## 2.2 Измерение на уфельной массе

При измерении содержания сухого вещества в утфеле, для микроволнового измерения не имеется различия между сухим веществом, содержащимся в кристаллах или в растворе. Для калибровки, микроволновые сигналы (фаза и затухание) соотносятся с данными лабораторного анализа образцов. Если в образце присутствуют кристаллы, они должны быть предварительно растворены (путем снижения концентрации) с тем чтобы затем определить общее содержание твердого.

Таким образом, микроволновая система всегда измеряет фактическое содержание сухого вещества, независимо от агрегатного состояния сахара – растворенного или частично кристаллизованного. На этом основана простота калибровки, так же как и высокая надежность при использовании на кристаллизации. Пробоотбор для калибровки может выполняться равномерно в течение всего процесса кристаллизации, независимо от стадии раствора или утфеля. Для определения калибровочной кривой достаточно двух образцов, поскольку калибровочная кривая в основном линейна.

Остальные измерительные технологии, используемые в процессе кристаллизации, менее надежны. Например, инфракрасное измерение неработоспособно на кристаллизационной суспензии, а для радиометрического измерения плотности необходимо две линейных калибровочных кривых, поскольку поглощение гамма-излучения различно в растворе и в утфеле.

## 2.3 Факторы, влияющие на измерение

### *(A) Размер кристаллов*

Влияние размера кристаллов на микроволновое измерение невелико. Присутствие кристаллов может оказывать влияние на погрешность измерения пропорционально соотношению длины волны к размеру кристалла. При соотношении длина волны / размер кристаллов  $> 10$ , влияние пренебрежимо мало. При обычно используемой частоте 2.5 ГГц, средняя длина волны в продукте составляет 30 мм. Соответственно, влияние кристаллов размеров  $< 3$  мм несущественно.

### *(B) Доброкачественность*

Оба микроволновых сигнала, фаза и затухание, хорошо коррелируют в большинстве случаев на большинстве применений. Фаза используется для калибровки из-за ее высокой измерительной чувствительности. Чувствительность измерения затухания существенно возрастает на соках с низкой очисткой. В таких случаях, для повышения точности измерения предпочтительнее использовать комбинированную калибровку, основанную на фазе и на затухании. Таким образом, достигается высокая точность микроволновой измерительной технологии на продуктах любой доброкачественности. Влияние колебаний доброкачественности в пределах одного продукта на погрешность измерения несущественно.

Все типы продуктов А, В и С (белый сахар, сахар-сырец и III продукт) на основе свеклы и сахарного тростника могут быть измерены аккуратно, достоверно и точно.

Дополнительно следует отметить, что существует четкая зависимость от доброкачественности вплоть до невозможности измерения при использовании кондуктометров и низкочастотных приборов, использующий иной частотный диапазон. Низкочастотные системы работают в диапазоне МГц, микроволновые – в диапазоне ГГц.

### *(C) Цвет и мутность*

Влияние цвета и мутности продукта на микроволновую систему несущественно.

### *(D) Температура продукта*

Ориентация молекул воды в микроволновом поле и, соответственно, измерение концентрации/влажности зависит от температуры. Температурное влияние в большинстве случаев линейно и может быть легко компенсировано.

При процессе кристаллизации в вакуумном аппарате, температура может изменяться в пределах 60 –80°C в зависимости от вакуума. Температурная зависимость в этом диапазоне также линейна.

Процессор Berthold рассчитывает параметры температурной компенсации автоматически на основании лабораторных данных образцов и обеспечивает простое управление даже в процессах кристаллизации путем охлаждения.

### **3. Обработка сигнала**

Для определения и анализа изменений фазовых и амплитудных характеристик волны требуется очень высокое качество обработки сигнала. Результат зависит от динамики оборудования, определенности измерения и стабильности СВЧ-генерации. Под динамикой оборудования понимается качество приема и/или распознавания микроволнового сигнала – чем выше динамика, тем выше точность прибора. Аналогия из природы: молодежь обладает более чутким слухом, и соответственно, более высокой акустической динамикой, по сравнению с пожилыми людьми. Аппаратная динамика анализатора Micro-Polar Brix составляет 70 дБ, что значительно превышает средний уровень других микроволновых систем, применяемых в сахарной промышленности.

Определенность измерения является базовой предпосылкой микроволнового измерительного прибора. Возможные скачки фазы могут быть интерпретированы прибором как соответствующие изменения концентрации, притом, что фазовая характеристика волны (которая может быть  $\pm 360^\circ$ ) в принципе однозначна. Таким образом, время от времени может возникать неопределенность измерения. Например, глядя на циферблат обычных механических часов, невозможно отличить, пять часов утра от пяти часов пополудни. Требуется дополнительная информация, например положение солнца или освещенность снаружи.

Micro-Polar Brix устраняет проблему неопределенности путем применения к результатам измерения квалифицированных критериев правдоподобия, что гарантирует достоверность фазы. Отдельная функция предусмотрена для ограничения пределов измерения.

#### 4. Микроволновая измерительная система: процессор и зонды

Микроволновая измерительная система Berthold состоит из двух компонентов:

- (А) Процессор, включающий высокопроизводительный блок обработки информации и цифровой СВЧ-генератор, собранный в надежном корпусе из нержавеющей стали и оснащенный графическим дисплеем
- (В) Микроволновой зонд – в виде погружного зонда, трубопроводного зонда или пары трубных антенн.

На Рис. 2 показано типовая конфигурация с погружным зондом. Для подключения микроволнового зонда к процессору всегда используется высокочастотный кабель.

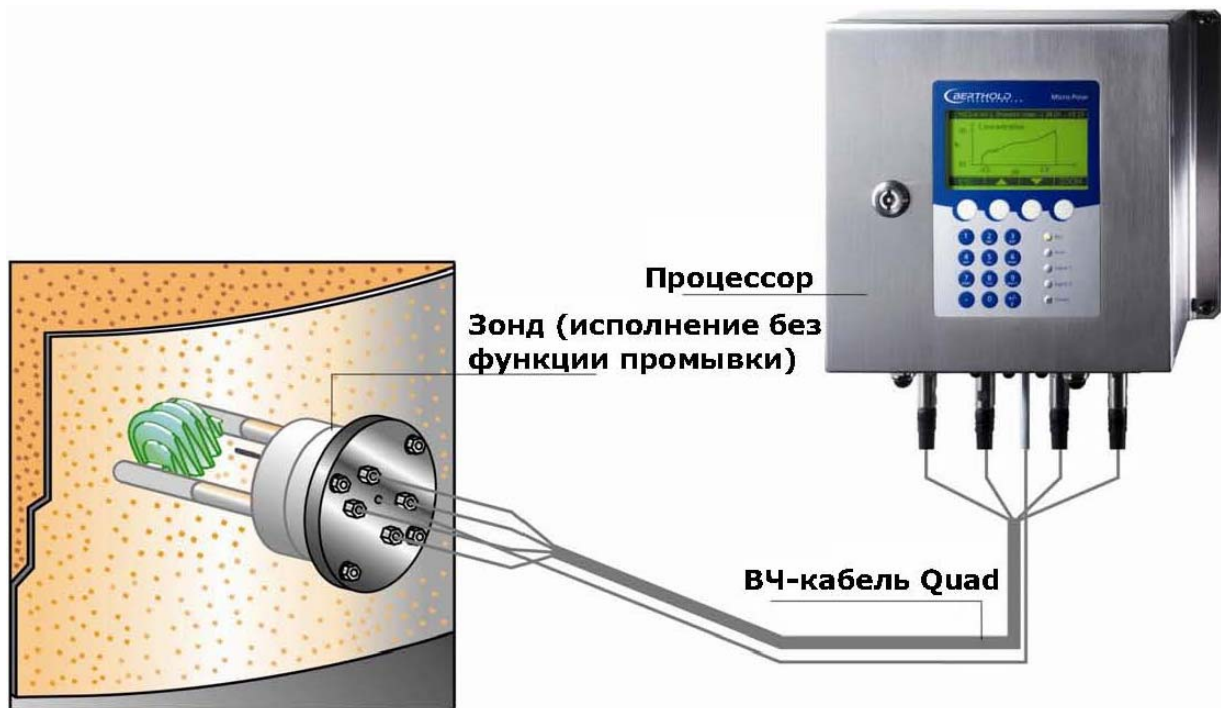


Рис. 2:  
Измерение в кристаллизаторе

##### (А) Процессор

Компактный процессор (цифровой процессор и микроволновой модуль) разработан для простого и понятного управления с помощью мягких клавиш и клавиатуры. Выходной сигнал передается по изолированному токовому выходу 0/4-20 мА и альтернативному интерфейсу RS232. Все параметры и калибрационные данные, сохраняемые в энергонезависимой EEPROM-памяти, защищены от утраты при отказе питания и легко могут быть заменены.

Процессор поддерживает один зонд, что гарантирует эксплуатационную надежность. Расстояние процессор-зонд до 10 м, что достаточно для размещения высокочастотного модуля вне горячей зоны, в которой находится зонд. Компактный процессор сертифицирован до применения при максимальной рабочей температуре +60°C. Второй высокочастотный канал является эталонным и обеспечивает высокую устойчивость от смещения показаний из-за изменений температуры рабочего кабеля.

Анализатор Micro-Polar Brix производства Berthold поддерживает до 4 пакетов калибрационных параметров для различных продуктов. Переключение продукта может быть выполнено как с клавиатуры, так и из аппаратной через внешний цифровой вход. Таким образом, в одном и том же кристаллизаторе могут быть измерены различные продукты.

При циклическом процессе, большим преимуществом является возможность распознавания паузы между двумя циклами и определение содержания сухого вещества автоматически без потери времени на выход на рабочий режим после нового запуска. Функция распознавания паузы в Micro-Polar Brix переключает токовый выход на нижнее предельное значение при выгруженном продукте. Новая величина содержания сухого вещества в новом растворе определяется только при следующей подкачке продукта в емкость, что обеспечивает возможность оперативного контроля.

Процессор Micro-Polar Brix самодостаточен для быстрой и простой инициализации и запуска; использование внешних компьютеров не требуется. Ручная запись результатов измерения образцов не требуется, поскольку пробоотбор автоматизирован. После простого ручного ввода соответствующих лабораторных данных, автоматически выполняется анализ регрессии и рассчитывается оптимальная калибрационная кривая. Лабораторные данные и результаты измерения выводятся на дисплей в графическом виде с указанием коэффициента корреляции.

#### *(В) Микроволновые зонды*

Погружной зонд поставляется в двух модификациях:

1. Погружной зонд без функции промывки, с встроенным РТ100
2. Погружной зонд с функцией промывки, без РТ100

Уникальной особенностью этих зондов, сравнительно с другими, является фокусированное микроволновое поле. Микроволны направлены только по направлению к противоположному стержню-приемнику, что снижает влияние на измерение внешних изменений вокруг зонда.

Встроенное устройство промывки погружного зонда разработано таким образом, что обеспечивает максимальную эффективность очистки при минимальном расходе. Небольшой расход промывочного раствора не оказывает никакого влияния на процесс кристаллизации. Таким образом, быстрое (несколько секунд) восстановление сигнала гарантирует безопасность контроля технологического процесса.

Погружные зонды поставляются с различными типоразмерами фланца, что упрощает замену, по сравнению с другими системами.

Погружные зонды в основном используются на технологических выпарных кристаллизаторах. Стандартный погружной зонд без промывки используется в циклическом процессе кристаллизации, зонд с функцией промывки – в непрерывном процессе.

Трубопроводный зонд (см. Рис. 3) полностью футерован фторопластом, и является полнопроходным, т.е. не имеет каких-либо деталей в проточной части. Конструкция гарантирует высокую устойчивость против абразивного износа и обеспечивает надежное измерение на таком применении как концентрация известкового молока.



Рис. 3:  
Микроволновой зонд,  
Трубопроводное исполнение



## 5. Практический опыт применения в сахарной промышленности

Микроволновые приборы Berthold успешно используются для решения самых разнообразных задач, такие как типовые применения на выпарных аппаратах непрерывного и периодического действия; измерение содержания сухого вещества в диффузионном соке, очищенном соке перед выпариванием и сиропе; и целый перечень специализированных применений.

В типовых применениях, обычная точность измерения составляет  $< 0.2\%$  по содержанию сухого вещества; детали были многократно описаны ранее, например, в докладе Митчелла и Шпрингера (2006). Описание двух специализированных применений приведено ниже.

### 5.1 Специализированные применения

С помощью микроволнового измерителя Berthold можно измерить не только содержание воды в сахарном сиропе/утфеле, но и выполнить целый ряд других применений в сахарной промышленности. Базовая физика измерения при этом неизменна: мы имеем один компонент – воду с высоким эффектом на прохождение микроволнового излучения и второй компонент, существенно менее подверженный взаимодействию с микроволнами. Примерами таких измерений являются измерение содержания сухого вещества в известковом молоке и измерение влажности в кристаллическом сахаре. Оба этих применения описаны ниже.

#### 5.1.1 Измерение влажности при производстве сахара-рафинада

Влажность кристаллического сахара должна контролироваться непосредственно перед подачей в формирующий фильтр, предназначенный для производства сахара-рафинада. Подача воды контролируется анализатором влажности Berthold. В этом случае подача воды должна осуществляться выше зоны измерения влажности. Точность измерения влажности имеет критическое значение для качества сахара-рафинада.

Измерительная система показана на Рис. 4. Микроволновые антенны установлены на измерительном лотке. Сахар накапливается в лотке для дальнейшей обработки, полностью заполняя, таким образом, микроволновое измерительное поле.

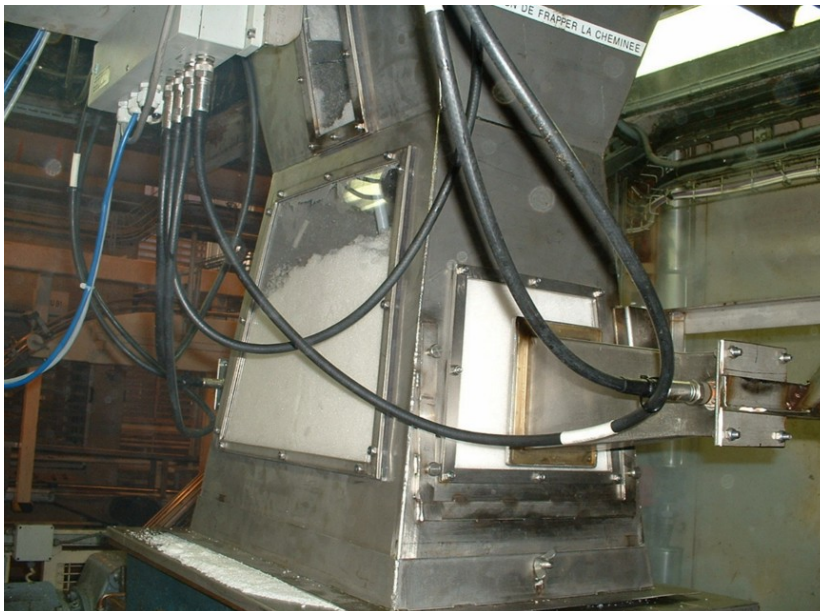


Рис. 4:  
Конфигурация для измерения влажности сахара

На Рис. 5 показано сравнение лабораторных данных и показаний микроволнового анализатора (BERTHOLD). Достигнутая точность измерения составляет < 0.05 весовых % влажности с корреляцией 0.969. При достигнутой точности гарантируется высокое качество продукта даже без использования дополнительного оборудования для компенсации колебаний насыпной плотности и/или температуры.

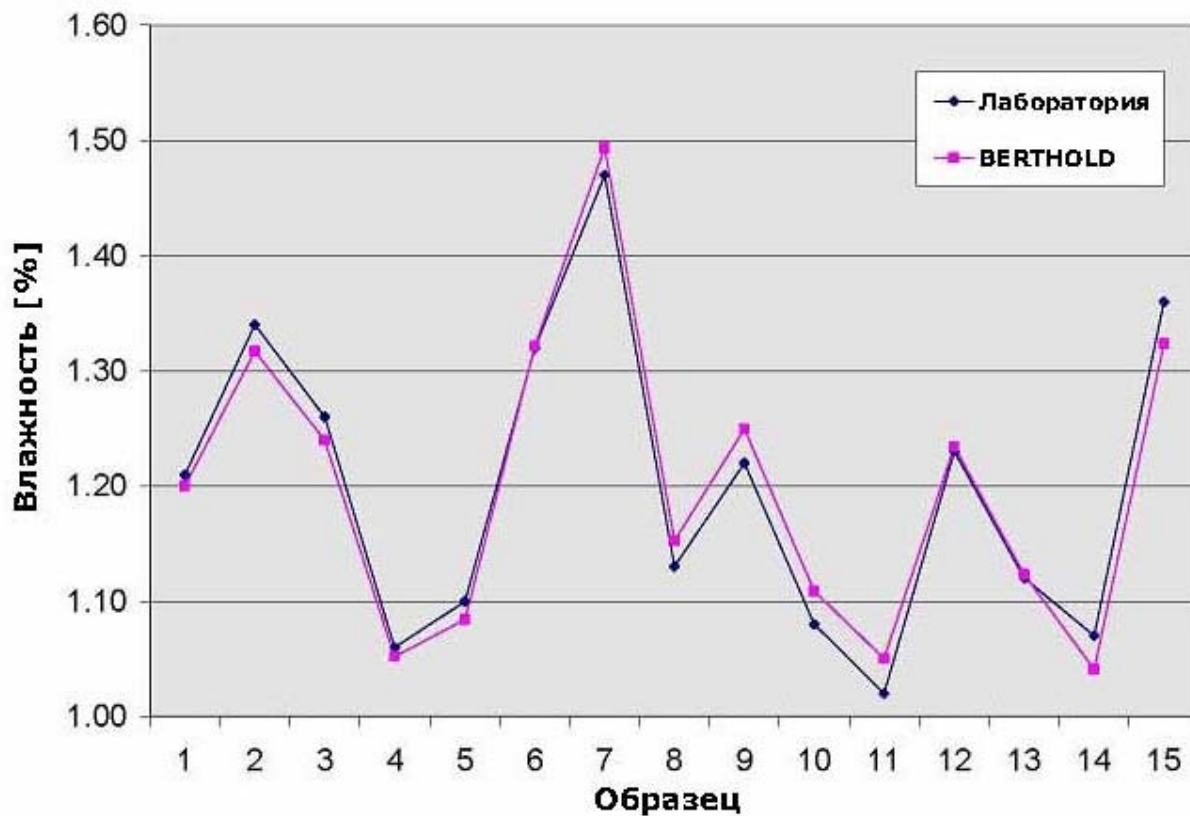


Рис. 5:  
Результаты измерения влажности

### 5.1.2 Определение содержания сухого вещества в известковом молоке

Сырой сок должен быть отделен от других составляющих (несахаров). Эти вещества отделяются путем дефекации - добавления известкового молока. Известковое молоко (промышленное известковое молоко с концентрацией около 21 Вé), концентрация которого должна быть постоянной насколько возможно, производится по технологической схеме, приведенной ниже (см. Рис. 6):

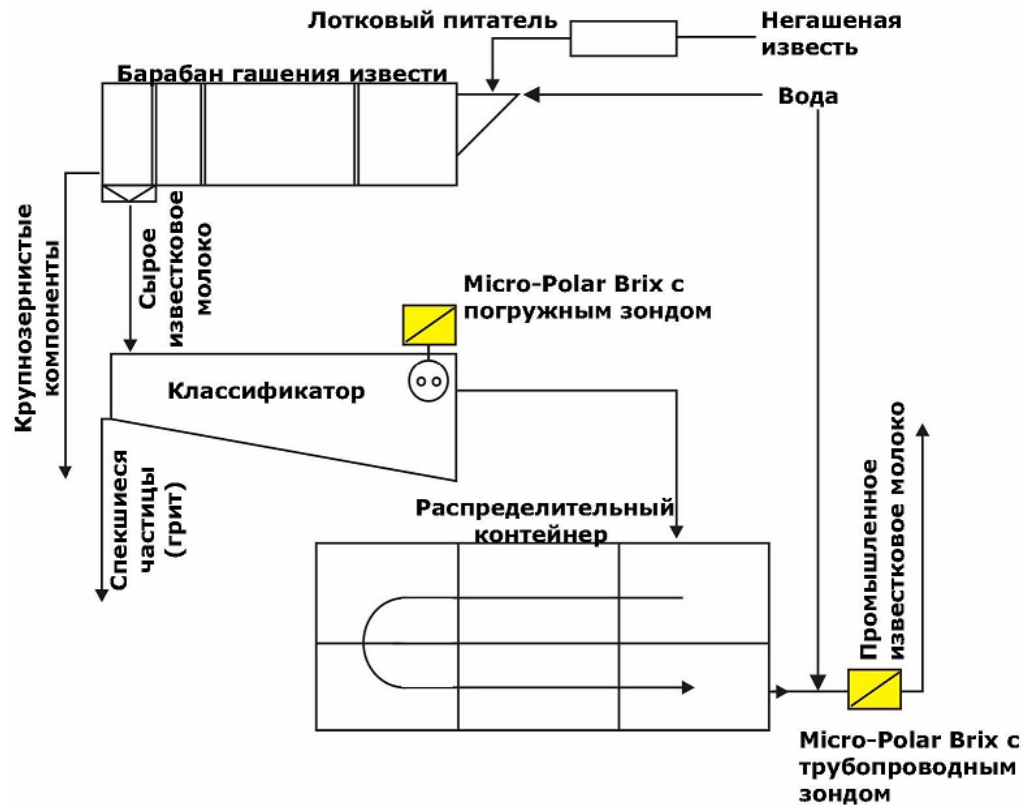


Рис. 6:

Последовательность производства известкового молока

Негашеная известь, поступающая из печи, равномерно подается в барабан и гасится гасильным раствором (водой). После отделения крупных твердых отбросов, таких как камни, полученное т.н. сырое известковое молоко поступает в классификатор, в котором осаждаются оставшиеся крупнозернистые компоненты и части непрореагировавшего продукта.

С помощью микроволнового измерения, установленного на классификаторе (погружной зонд, см. Рис. 7 и 8), сокращается время реакции и обеспечивается контроль за концентрацией сырого известкового молока на уровне около 22.5 Вé путем изменения подачи негашеной извести. На данном применении достижимая точность микроволнового измерения составляет 0.15 Вé.

Известковое молоко из классификатора поступает в распределительный контейнер, состоящий из нескольких последовательных камер. Известковое молоко, полученное с концентрацией около 22.5 Вé, далее измеряется микроволновой системой и регулируется подачей гасильного раствора в промышленное известковое молоко. Достижимая точность составляет 0.1 Вé.

В общем случае трубопроводный измерительный зонд используется для измерения концентрации промышленного известкового молока. Зонд устанавливается в существующий в трубопровод Ду, например, 65 мм.

Рис. 7:  
Применение на известковом молоке



Рис. 8:  
Погружной зонд на классификаторе



## **6. Заключение**

За последние несколько лет микроволновая технология для измерения содержания сухого вещества получила широкое признание в сахарной промышленности. Существенный вклад для получения этого признания были новаторские разработки Berthold Technologies. Первое микроволновое применение было выполнено в сезон 1997 на сахарном заводе Jülich, Германия на кристаллизаторах выпаривания белого сахара и сахара-сырца.

В силу своих физических свойств, описанных в настоящем докладе, реализованных в эффективных микроволновых системах, микроволновая измерительная техника предлагает очень точное и надежное измерение концентрации во всех областях сахарной промышленности. Область применения не ограничивается такими стандартными применениями как, например, процессы кристаллизации выпариванием, но и позволяет выполнить ряд специализированных измерений.

Berthold Technologies поставляет оборудование для сахарной промышленности более 30 лет. Знания и опыт этих лет легли в основу Micro-Polar Brix. Micro-Polar Brix имеет успешный опыт эксплуатации на значительном числе применений и предлагает надежное и точное измерение на основе наиболее современных разработок в области микроволновой технологии, объединенное с простотой и безопасностью в использовании.

В то время как иногда возникают дискуссии о безопасности мобильных телефонов, можно быть уверенным, что системы с низкоэнергетическими микроволнами оказывают весьма незначительное влияние, как на человеческий организм, так и на окружающую среду, и являются абсолютно безопасными.

Частотный диапазон Micro-Polar Brix лицензирован FCC (Федеральная Комиссия по Коммуникациям) и ETSI (Европейским Институтом по Телекоммуникационным Стандартам).

## **ЛИТЕРАТУРА**

**Клюте, У.**(2006). Процедура микроволнового измерения при экстракции сока. Издание Ассоциации Технологов Сахарной Промышленности США (SIT), 65, документ 912

**Митчелл, Г.Е. и Шпрингер, Х.К.** (2006). Анализ микроволнового зонда Berthold Technologies., издание Южноафриканской Ассоциации Технологов Сахарной Промышленности (SASTA), 80: 365-367