

УДК534:321.9:534.6

Т.М. Ильницкая, В.П. Чалый, А.А. Костеров

*Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт измерительных и управляющих систем» (ДП НДИ «Система»), Львов, Украина***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭТАЛОНА***Разработаны и внедрены метод Монте-Карло и универсальная прикладная программа для оценивания неопределенности измерения на эталоне единицы мощности ультразвука в водной среде.***Ключевые слова:** метод Монте-Карло, эталон, мощность ультразвука, неопределенность.**Введение**

Измерения акустических величин в ультразвуковом диапазоне частот на Украине, как и в других развитых странах, проводятся практически во всех сферах человеческой деятельности: в промышленности, науке, биологии, охране окружающей среды, и, особенно, в медицине. Обязательным условием успешного применения ультразвука во всех этих случаях являются точные и достоверные результаты измерения его характеристик: акустического давления, мощности и интенсивности ультразвука, скорости распространения звука в воде, которые прослеживаются к эталонам системы единиц SI [1-3], обеспечивая доверие к ним в соответствии с Соглашени-

ем о взаимном признании МРА [4].

До недавнего времени в Украине отсутствовала в полном объеме система метрологического обеспечения в области мегагерцового ультразвука в водной среде: отсутствовали первичные и вторичные эталоны, небыло государственной поверочной схемы передачи размеров единиц физических величин, которые характеризуют ультразвук. Поэтому в Государственную программу развития эталонной базы на 2006-2010 годы была включена опытно-конструкторская работа по созданию эталона единицы мощности ультразвука в водной среде, который создан в ДП НДИ «Система» и внедрен, как исходный для Украины, с регистрационным номером ВЕТУ 10-169-01-11 (рис. 1).

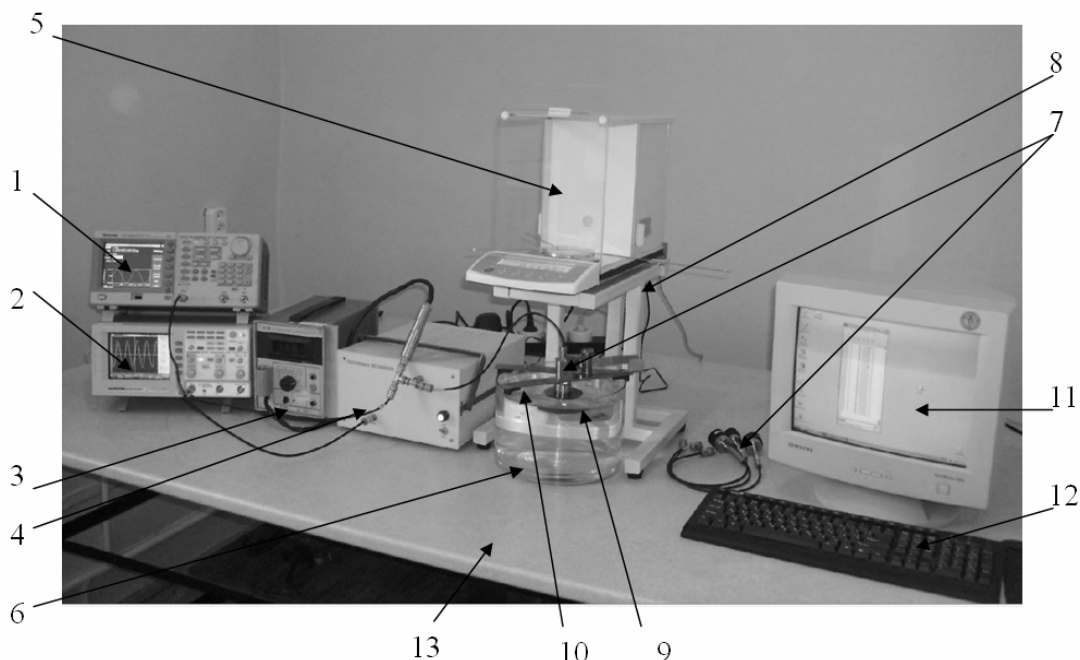


Рис. 1. Основная аппаратура эталона единицы мощности ультразвука в водной среде ВЕТУ 10-169-01-11 (защитный кожух снят):

- 1 – генератор; 2 – осциллограф; 3 – вольтметр; 4 – усилитель мощности; 5 – весы; 6 – бачок;  
7 – комплект ультразвуковых излучателей; 8 – подставка под весы; 9 – плоская звукопоглощающая мишень с адсорбирующего материала на подвесках; 10 – зажим излучателя; 11 – монитор;  
12 – клавиатура; 13 – система защиты от шума и вибрации

Одним из эффективных способов существенно повышения точности измерения заключается в более строгом и детальном описании измеряемой величины. В результате модель измерений становится чрезвычайно сложной и зачастую существенно нелинейной. Аналитические методы исследования характеристик точности на основе таких моделей, рекомендуемые международными [5] и национальными [6] нормативными документами, становятся довольно трудоемкими, а иногда принципиально непригодными.

**Постановка задачи.** В связи с изложенным выше возникла необходимость поиска других, более эффективных методов корректной оценки неопределенности измерения, что и явилось целью настоящей работы.

При определении оптимальных параметров эталона единицы мощности ультразвука в водной среде в процессе его разработки использовалась упрощенная модель измерения и применялся аналитический метод оценивания неопределенности – усо-

вершенствованный метод PUMA (Procedure for Uncertainty Management) [7]. Однако для корректной оценки характеристик точности уже созданного эталона необходимо было более полно описать процесс измерения и оказалось целесообразным применить метод Монте-Карло (МСМ), разработанный при исследовании точностных характеристик государственного акустического эталона единицы звукового давления [8 – 11].

### Основной материал

**Физическая модель.** Воспроизведение единицы мощности ультразвука эталоном основано на физическом эффекте динамического воздействия излучаемого ультразвукового луча с твердой неподвижной преградой – мишенью. Радиационная сила, действующая на мишень, измеряется методом баланса с использованием прецизионных электронных весов [12]. Анализ процесса измерения привел к следующей физической модели, представленной на рис. 2.

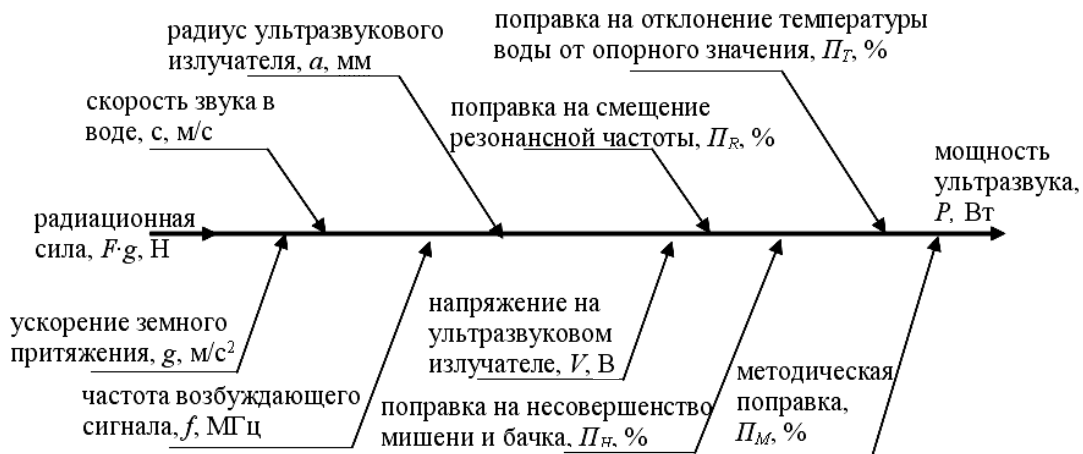


Рис. 2. Физическая модель эталона единицы мощности ультразвука

**Математическая модель измерения.** В соответствии с физической моделью и согласно [7, 12] математическая модель измерения может быть представлена в виде системы уравнений:

$$P = c \cdot m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}\right) \left(1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)\right)^{-1} \times \left(\frac{V_0}{V}\right)^2 (1 + \Pi_R + \Pi_T + \Pi_H + \Pi_M); \quad (1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{c}{f}; \quad (2)$$

$$\Pi_T = \alpha \cdot \Delta T; \quad (3)$$

$$\Pi_R = \begin{cases} \pm[\beta + \gamma(\delta f - \delta f_0)], & \text{если } \delta f > \delta f_0; \\ \pm\beta, & \text{если } \delta f \leq \delta f_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $c$  – скорость звука в воде;  $m$  – масса (показания весов в единицах массы), пропорциональная

радиационной силе;  $g$  – ускорение земного притяжения;  $J_n$  – функция Бесселя 1-го рода порядка  $n$ ;  $a$  – эффективный радиус активного элемента ультразвукового излучателя (УЗВ);  $k$  – волновое число;  $V_0, V$  – электрическое напряжение на входе УЗВ, соответственно, опорное и актуальное;  $\Pi_R, \Pi_T, \Pi_H, \Pi_M$  – поправки, соответственно, на смещение резонансной частоты, отклонение температуры от опорного значения, на несовершенство мишени и бачка, методическая;  $\lambda$  – длина акустической волны;  $f$  – частота возбуждающего сигнала;  $\Delta T$  – отклонение температуры воды от опорного значения (21,5 °C);  $\delta f$  – относительное смещение резонансной частоты;  $\alpha, \beta, \gamma$  – постоянные коэффициенты:

$\alpha = \pm 0,2\%$  – при изменении температуры воды на  $\pm 1,0$  °C [12];

$\beta = 0,5\%$ ;  $\gamma = 7,3$  – для пьезокерамических УзВ [13];

$\beta = 0,05\%$ ;  $\gamma = 80$  – для монокристаллических УзВ [13].

**Входные величины.** В соответствии с моделью измерения (1) – (4) произведен сбор и анализ априорной информации о входных величинах (об информативных и неинформативных параметрах и влияющих величинах) существенно влияющих на результат измерения. Исходя из полученной информацией установлены номинальные значения и характеристики точности (отклонения) входных величин, законы распределения плотности вероятности, а также произведен анализ на наличие корреляции между входными величинами. При использовании МСМ нет необходимости вычислять предварительно стандартные неопределенности входных величин; достаточно иметь границы варьирования и установить модельный закон. Информация о входных величинах в варианте с ультразвуковым излучателем с пьезокерамическим дисковым чувствительным элементом  $\varnothing 25 \times 1$  мм (резонансная частота 1,877 МГц) представлена в таблице 1 (в предположении об отсутствии корреляции между входными величинами).

**Имитационное моделирование процесса измерения.** Для имитационного моделирования процесса измерения на исходном эталоне единицы мощности ультразвука по МСМ была разработана универсальная программа на языке Delphi 6. На рис. 3 представлено диалоговое окно данной программы.

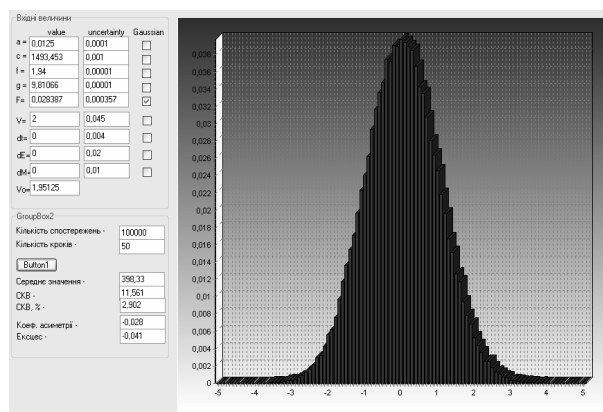


Рис. 3. Диалоговое окно программы для имитационного моделирования процесса измерения на исходном эталоне единицы мощности ультразвука по МСМ

Суть МСМ [9, 10, 14] применительно к исследованию неопределенности измерений заключалась в следующем: каждый раз при вычислении функции измерения в уравнении (1) – (4) подставлялись генерируемые случайные значения входных

величин, каждая из которых варьирует вокруг своего номинального значения в пределах интервала неопределенности в соответствии со своим законом распределения плотности вероятности (PDF). При этом номинальные значения таких входных величин как  $m$ ,  $f$  и  $V$  (см. рис. 2) брались непосредственно по данным экспериментальных исследований. Полученный в процессе многократных «наблюдений» массив значений выходной величины, который несет полную информацию об измеряемой величине – мощности ультразвукового излучения, обрабатывается статистически: весь массив при этом разбивается на 50 интервалов. При каждом измерении проводилось не менее 100 000 «наблюдений». При числе «наблюдений» менее 10 000 результаты оказывались статистически неустойчивыми. Наилучшая оценка измеряемой величины определялась как среднее арифметическое. Оценка суммарной стандартной неопределенности вычислялась как экспериментальное среднее квадратическое отклонение (СКО). Расширенная неопределенность при заданной доверительной вероятности находилась непосредственно из интегрального распределения вероятности выходной величины, не прибегая при этом к предварительному вычислению эффективного числа степеней свободы и установлению коэффициента расширения. Наоборот, коэффициент расширения для доверительной вероятности 0,95 был рассчитан по расширенной неопределенности.

Оценивался вклад неопределенности каждой входной величины в суммарную стандартную неопределенность выходной, а также вычислялись доли их вкладов.

**Результаты исследований и их анализ.** Оценивание неопределенности измерения на эталоне по МСМ было проведено для штатного режима его работы при номинальных мощностях излучения ультразвука 25; 400; 1000 и 4000 мВт на основной резонансной частоте ультразвукового излучателя.

В процессе работы программы вычислялось среднее значение измеряемой величины (мощности ультразвука), среднее квадратическое отклонение (СКО), представляющее суммарную стандартную неопределенность, вклады и доли вкладов, а также при необходимости коэффициент асимметрии и эксцесс распределения. Результаты расчета представлены для иллюстрации в виде бюджета неопределенности в таблице 1 (для номинальной мощности 4 Вт) и проиллюстрированы на рисунке 4 при номинальной мощности 25 мВт.

Расширенная неопределенность определялась непосредственно из интегрального распределения (см. рис. 4, б) при уровне доверительной вероятности 0,95. С интегрального распределения может быть также определен коэффициент расширения.

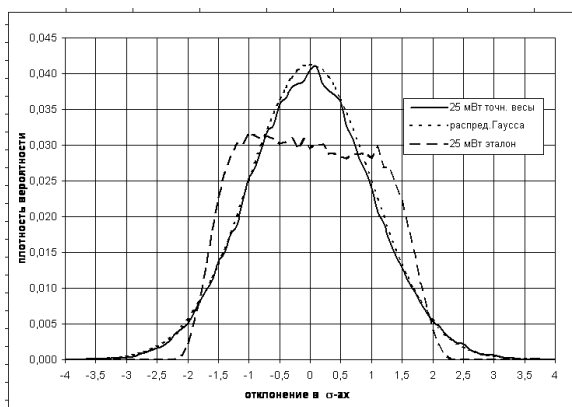
Как видно из таблицы, основной вклад в расширенную неопределенность вносит неопределенность «взвешивание» радиационной силы ультразвукового луча, то есть погрешность весов. Поэтому моделирование проведено для двух вариантов эталона: для существующего эталона, укомплектованного электронными весами типа XA60 Redwag, и прогнозный вариант для усовершенствованного эталона с более точными весами типа XP105DR Mettler Toledo. Дифференциальное распределение выходной измеряемой величины (PDF), в варианте с менее

точными весами, когда доля вклада неопределенности взвешивания, распределенная по прямоугольному закону, превалирует над остальными также стремится к прямоугольному (см. рис. 4, а); коэффициент расширения при этом равен 1,7 (см. рис. 4, б). В варианте с более точными весами доля вклада их неопределенности соизмерима с остальными составляющими суммарной неопределенности. PDF при этом близко к распределению по закону Гаусса и коэффициент охвата, равный 1,95 мало отличается от рекомендуемого, равного 2.

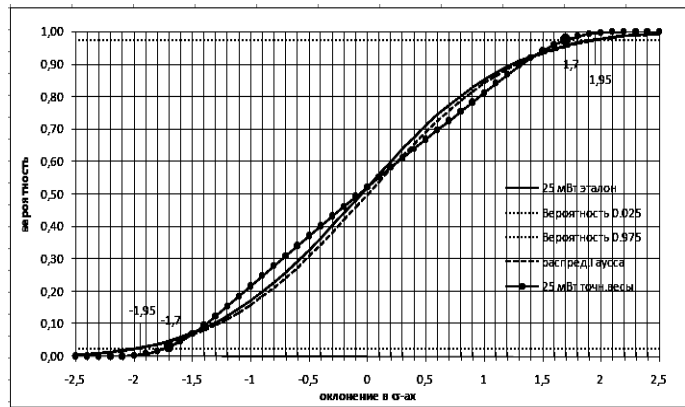
Таблица 1

Бюджет неопределенности измерения на эталоне по МСМ при номинальной мощности 4 Вт

№ п/п	Входные величины						Выходные величины	
	Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Номинальное значение, мВт	Характеристики точности (отклонение), мВт	Модельный закон распределения	Вклад, %	Доля вклада, %
1	Напряжение на ультразвуковом излучателе	V	В	6,10	0,110	равн.	1,12	21,24
2	Показания весов	m	мг	284,9	0,85	Гаусс	2,01	68,42
3	Частота возбуждающего сигнала	f	МГц	1,877	0,00001	равн.	0,08	0,11
4	Ускорение земного притяжения	g	м/с <sup>2</sup>	9,81	0,001	равн.	0,12	0,24
5	Радиус ультразвукового излучателя	a	мм	12,5	0,0001	равн.	0,20	0,68
6	Поправка на отклонение температуры воды от опорного значения	П <sub>Т</sub>	°С	0	0,004	равн.	0,21	0,75
7	Методическая поправка	П <sub>М</sub>	Вт	0	0,02	равн.	0,94	6,10
8	Скорость звука в воде	c	м/с	1493	0,001	равн.	0,00	0,00
9	Поправка на несовершенство мишени и бачка	П <sub>Н</sub>	Вт	0	0,01	равн.	0,53	2,71
<b>Мощность, P, Вт</b>							<b>4,26</b>	
<b>Суммарная стандартная неопределенность, %</b>							<b>2,43</b>	
<b>Коэффициент охвата (расширения) при уровне доверительной вероятности 0,95</b>							<b>2,00</b>	
<b>Расширенная неопределенность при уровне доверительной вероятности 0,95; U, %</b>							<b>4,86</b>	



а



б

Рис. 4. Дифференциальное (а) и интегральное (б) распределения плотности вероятности измеряемой величины (мощности при номинальном значении 25 мВт) для исходного эталона и для усовершенствованного с более точными весами

## Выводы

1. Разработан и внедрен метод Монте-Карло (МСМ) и универсальная прикладная программа для персонального компьютера применительно к оцениванию неопределенности измерения на эталоне единицы мощности ультразвука.

2. Оценка суммарной стандартной и расширенной неопределенности при выбранном уровне доверительной вероятности при этом методе определяется непосредственно из фактического интегрального распределения измеряемой величины (не прибегая к вычислению эффективного числа степеней свободы и коэффициента расширения). Исключаются также составляющие неопределенности, связанные с линеаризацией нелинейной модели измерения, с предположением о гауссовом законе распределения плотности вероятности выходной величины и с вычислением эффективного числа степеней свободы и коэффициента охвата.

3. Допущение о распределении выходной величины по закону Гаусса не подтверждается во многих важных для практики случаях. МСМ одинаково эффективен не зависимо от закона распределения выходной величины.

4. Разработанный метод и аналогичная программа для персонального компьютера могут быть использованы при других видах измерения, где модель измерения громоздкая и существенно нелинейная.

## Список литературы

1. Колпак Б.Д. Стан та проблеми метрологічного забезпечення акустичних вимірювань в Україні / Б.Д. Колпак, Е.В. Пасько, В.П. Чалий // *Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2002): зб. праць III Міжнародної науково-технічної конференції*. – Х.: ХДНДІМ, 2002. – Т. 2. – С. 105-107.
2. Колпак Б. Проблеми забезпечення єдності вимірювань акустичних величин в ультразвуковому діапазоні частот / Б. Колпак, В. Чалий, Т. Ільницька // *Метрологія та прилади*. – 2008. – № 2. – С. 3-9.
3. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» от 11.02.1998 №113/98-ВР (в редакції Закону України от 15.06.2004 № 1765-IV).
4. *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes*. – Paris, 14 October 1999.

5. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition*. – ISO, Switzerland, 1993.

6. МИ 2083-90 ГСН. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

7. *Применение метода PUMA при построении эталона единицы мощности ультразвука* / В.В. Паракуда, Б.Д. Колпак, В.П. Чалий, Т.М. Ильницькая // *Системи обробки інформації: зб. наук. пр.* – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 4 (71). – С. 66-70.

8. *Числовые методы оценки неопределенности измерений при калибровке микрофонов на первичном эталоне* / В.П. Чалий, В.В. Паракуда, Б.Д. Ковпак, О.О. Костеров, М.В. Гайдук // *Обучающий семинар КООМЕТ: сб. тезисов*. – Минск: БелГИМ, 2003. – С. 48-50.

9. *Оценивание неопределенности первичного акустического эталона числовыми методами* / В.П. Чалий, В.В. Паракуда, А.А. Костеров, Н.В. Гайдук // *Математические методы при обеспечении качества и взаимного признания результатов измерений: тезисы докладов на международном научно-техническом семинаре*. – СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2004. – С. 84-87.

10. *Оценивание неопределенности первичного акустического эталона числовыми методами* / В.П. Чалий, В.В. Паракуда, А.А. Костеров, Н.В. Гайдук // *Измерительная техника*. – 2005. – № 5. – С. 15-19.

11. Чалий В.П. *Оценивание неопределенности в измерениях методом Монте-Карло и методом численного дифференцирования* / В.П. Чалий, А.А. Костеров // *Метрология и метрологично осигуряване: сб. доклади XVII-ти Национален научен симпозиум с международно участие*. – Сопот: Технически университет София; изд-во "СОФТТРЕЙД", България, 2007. – С.36-41.

12. IEC 61161:2006 (Second edition). *Ultrasonics - Power measurement - Radiation force balances and performance requirements*

13. *Заклучний звіт про ДКР „Створення вторинного еталона одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі” (шифр 06.17.22) -ДП НДІ “Система”, Львів*. – 2010.

14. ISO/IEC Guide 98-3/Suppl.1:2008. *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method*.

15. ISO/IEC Guide 98-1: 2009. *Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement*.

Поступила в редколлегию 13.01.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЕТАЛОНА

Т.М. Ільницька, В.П. Чалий, О.О. Костеров

Розроблені та впроваджені метод Монте-Карло і універсальна прикладна програма для оцінювання невизначеності вимірювання на еталоні одиниці потужності ультразвуку у водному середовищі.

**Ключові слова:** метод Монте-Карло, еталон, потужність ультразвуку, невизначеність.

## APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD FOR THE ESTIMATION OF UNCERTAINTY OF THE ULTRASONIC STANDARD

T.M. Ilnytska, V.P. Chalyy, A.A. Kosterov

The Monte Carlo method and the universal programme for the estimation of uncertainty in measurement at the measurement standard of ultrasound power unit in water medium were developed and implemented.

**Keywords:** Monte Carlo method, standard, ultrasound power, uncertainty.