

УДК 621.791.3

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ

(Белорусский национальный технический университет, Минск);

канд. техн. наук, доц. Ю.А. ЦУМАРЕВ, Т.С. ЛАТУН

(Белорусско-Российский университет, Могилев)

Рассмотрена проблема неопределенности, возникающей при оценке результатов механических испытаний, обусловленная попарным нагружением испытываемых паяных швов. Предложена методика, которая основана на статистической оценке среднего значения превышения прочности одного из испытываемых паяных швов. Это значение должно соответствовать максимальному совпадению дисперсий исходной выборки и совокупности параметров прочности, полученной путем оценки для всех паяных швов. Проведена экспериментальная проверка предлагаемой методики, которая показала возможность практического ее применения. Предложенную методику статистической оценки показателей прочности паяных соединений можно рекомендовать для более достоверного и корректного сравнения результатов, полученных при испытании образцов различных типов.

Введение. Пайка является одним из важнейших технологических процессов современного промышленного комплекса. Она широко применяется для соединения цветных металлов и сплавов, разнородных материалов, а также элементов, имеющих разную толщину. В практике пайки находят применение разнообразные типы соединений, которые имеют различные характеристики несущей способности даже при совершенно одинаковых технологиях изготовления. В связи с этим достаточно актуальной проблемой является обоснованное сопоставление данных по прочности, относящихся к разным типам паяных соединений. Например, для соединения труб могут использоваться паяные соединения двух типов [1, 2] (рис. 1).

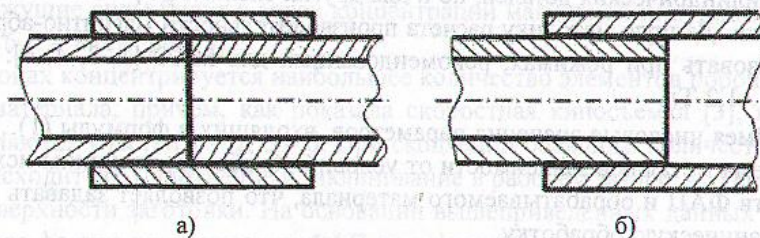


Рис. 1. Типы паяных соединений труб:
а – муфтовое; б – телескопическое

Особенностью конструкции, показанной на рисунке 1 а, является наличие двух паяных швов, работающих параллельно. Здесь рабочая нагрузка не распределяется между двумя швами, а воспринимается полностью каждым швом. Аналогичным образом работают под нагрузкой паяные соединения пластин, снабженные накладками (рис. 2).

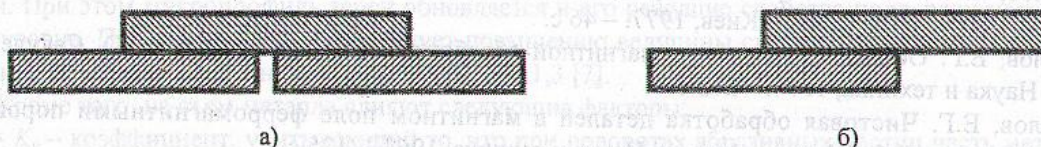


Рис. 2. Паяные соединения пластин:
а – с накладкой; б – нахлесточное

Паяные соединения с двумя швами используются также в конструкции стандартного образца для проведения испытаний на прочность при циклическом нагружении, которые осуществляются методом изгиба с вращением [3]. При этом кроме образцов с двумя испытываемыми паяными швами находят применение образцы с одним паяным швом, конструкция которых показана на рисунке 3.

Наличие двух одновременно и одинаково нагружаемых паяных швов приводит к неопределенности в оценке их прочностных характеристик, обусловленной тем, что до разрушения доводится только один из испытываемых швов. Поэтому информация о прочностных характеристиках более прочного шва не учитывается, искажая тем самым полученные результаты. В работе [4] показано, что при проведении

испытаний на статическое растяжение оценка предела прочности при срезе может быть занижена на 8 %. В этой же работе установлено, что при испытаниях на выносливость регистрируется количество циклов, которое на 14 % меньше, чем полученное на образцах с одним паяным швом [4].

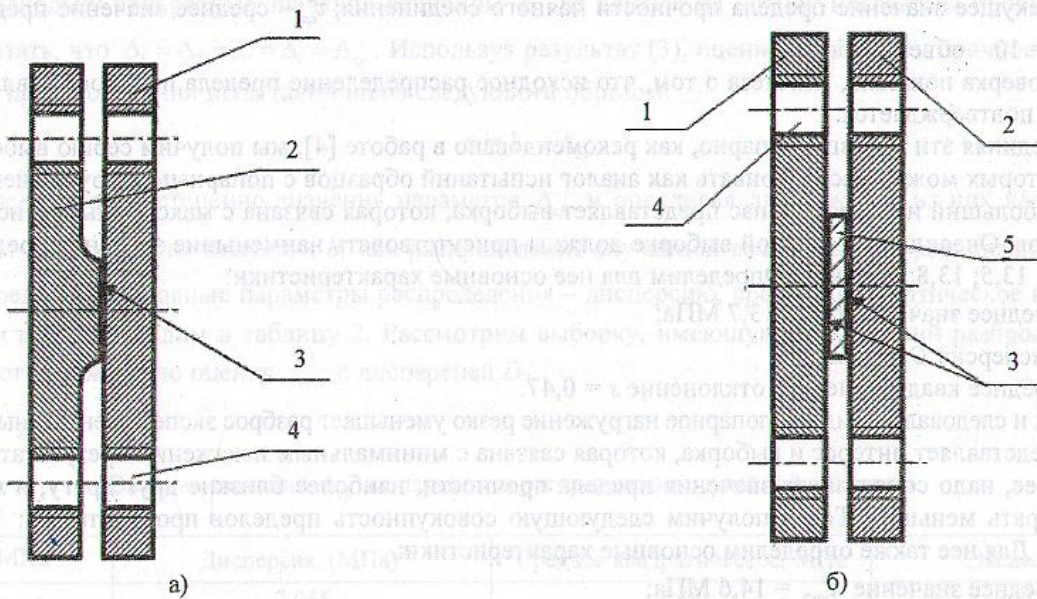


Рис. 3. Конструкции образцов для испытания паяных соединений с одним швом (а) и двумя швами (б) на циклическую прочность методом изгиба с вращением:
1, 2 – пластины; 3 – паяные швы; 4 – крепежные отверстия; 5 – диск

Устранение такой неопределенности, возникающей при попарном нагружении паяных швов, в работе [4] предложено производить путем изменений, вносимых в конструкцию образца для проведения испытаний на выносливость. Эти изменения сводятся к тому, что устраняется второй паяный шов (см. рис. 3) или изменяются его размеры и соответственно несущая способность [5 – 7].

Для испытаний на статическое растяжение (наиболее распространенных при определении работоспособности) рекомендации отсутствуют. Это приводит к тому, что при разработке технологических процессов пайки и конструировании паяных соединений разработчики сталкиваются с несоответствием результатов, полученных при растяжении стандартных образцов с одним паяным швом, и данными по испытаниям реальных конструкций, например, муфтовых соединений труб. Оптимистические ожидания, основанные на результатах испытаний стандартных образцов, не подтверждаются данными, получаемыми при проверочных испытаниях. Это увеличивает сроки разработки конструкторско-технологической документации и внедрения новых конструкций. Кроме того, затрудняется оценка результатов, получаемых другими исследователями.

Цель данной работы – разработка методики статистической обработки результатов, обеспечивающей получение более согласованных данных при испытании паяных соединений разной конструкции.

Основная часть. Рассмотрим данные результатов испытания на статическое растяжение 10-ти паяных образцов, приведенные в работе [4]. Определим статистические характеристики этой выборки: среднее значение предела прочности $\tau_{cp}^e = 14,9$ МПа; дисперсия $D = 2,25$; среднее квадратическое отклонение $s = 1,5$; асимметрия $As = 0,75$; эксцесс $Ex = 0,0617$.

Таблица 1

Пределы прочности на срез паяных соединений алюминий-медь

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Предел прочности при срезе, Па	15,5	13,8	17,8	13,5	14,2	15,3	16,7	15	14	13

Производим проверку исходного распределения предела прочности на нормальность по критериям асимметрии и эксцесса [8]:

$$\left| \frac{1}{ns^3} \sum_{i=1}^n (\tau_i^e - \tau_{cp}^e)^3 \right| \leq 3 \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (1)$$

$$|Ex| \leq 5 \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}, \quad (2)$$

где τ_i^e – текущее значение предела прочности паяного соединения; τ_{cp}^e – среднее значение предела прочности; $n = 10$ – объем выборки.

Проверка показала, гипотеза о том, что исходное распределение предела прочности является нормальным, подтверждается.

Соединяя эти образцы попарно, как рекомендовано в работе [4], мы получим серию выборок, каждую из которых можно рассматривать как аналог испытаний образцов с попарным нагружением. Из этой серии наибольший интерес для нас представляет выборка, которая связана с максимальным искажением результатов. Очевидно, что в этой выборке должны присутствовать наименьшие значения предела прочности (13; 13,5; 13,8; 14; 14,2). Определим для нее основные характеристики:

- среднее значение $\tau_{cp1}^e = 13,7$ МПа;

- дисперсия $D_1 = 0,22$;

- среднее квадратическое отклонение $s = 0,47$.

Как и следовало ожидать, попарное нагружение резко уменьшает разброс экспериментальных данных.

Представляет интерес и выборка, которая связана с минимальным искажением результатов. Чтобы получить ее, надо сопоставить значения предела прочности, наиболее близкие друг другу, и из каждой пары выбрать меньшее. Тогда получим следующую совокупность пределов прочности: 13; 13,8; 14,2; 15,3; 16,7. Для нее также определим основные характеристики:

- среднее значение $\tau_{cp2}^e = 14,6$ МПа;

- дисперсия $D_2 = 2,065$;

- среднее квадратическое отклонение $s = 1,44$.

У каждого образца с двумя паяными швами один из них прочнее другого на некоторую величину Δ_i .

Поэтому соотношение между показателями прочности паяных швов одного и того же образца запишется следующим образом:

$$a_i = b_i + \Delta_i. \quad (3)$$

С учетом результата (3) среднее арифметическое значение предела прочности для серии испытаний образцов с двумя паяными швами, учитывающее прочность всех швов, определится следующим образом:

$$\tau_{cp}^e = \frac{1}{2n} \sum (a_i + b_i) = \frac{1}{2n} \sum (b_i + \Delta_i + b_i) = \frac{2 \sum b_i}{2n} + \frac{\sum \Delta_i}{2n} = b_{cp} + \Delta_{cp}, \quad (4)$$

где b_{cp} – среднее арифметическое значение предела прочности, полученное с учетом только менее прочных паяных швов; Δ_{cp} – среднее значение превышения прочности одного из швов в одном и том же образце.

Результат (4) показывает, что для полной оценки среднего значения прочности образцов с двумя швами необходимо определить только один параметр – Δ_{cp} . Конкретные значения величин Δ_i не влияют на эту оценку.

Используя результат (4) можно решать две противоположные друг другу задачи. Одна из них, более простая, связана с оценкой величины b_{cp} на основании результатов испытания стандартных образцов с одним паяным швом. Необходимость в решении такой задачи может возникнуть, например, при анализе литературных данных с целью предварительной оценки возможной прочности соединений муфтового типа, паянных по той же технологии.

Для решения этой задачи достаточно по рассмотренной выше схеме определить минимальную (τ_{cp1}^e) и максимальную (τ_{cp2}^e) оценки этой величины. Наиболее вероятное значение предела прочности паяных соединений муфтового типа определится как среднее арифметическое:

$$\tau_m^e = \frac{\tau_{cp1}^e + \tau_{cp2}^e}{2}. \quad (5)$$

В рассматриваемом нами случае получим $\tau_m^e = 14,15$ МПа, что более чем на 5 % отличается от показателя прочности стандартных образцов.

Вторая, обратная, задача заключается в оценке величины τ_{cp}^e по результатам испытания паяных соединений муфтового типа. Здесь надо по данным о несущей способности менее прочных паяных швов (значениям b_i) оценить величину τ_{cp}^e .

По нашему мнению, при такой оценке надо исходить из того, что характеристика прочности всех паяных швов является одной и той же случайной величиной с одним и тем же значением дисперсии D и среднего квадратического отклонения s .

Поскольку конкретные значения величины Δ_i не влияют на оценку показателя прочности τ_{cp}^e , можно считать, что $\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_i = \Delta_{cp}$. Используя результат (3), оценим показатели прочности не разрушенных при проведении испытаний швов следующим образом:

$$a_i = b_i + \Delta_{cp}. \quad (6)$$

Увеличивая постепенно значения параметра Δ_{cp} и определяя для каждого из них величины a_i рассмотрим совокупность чисел a_i и b_i как распределение случайной величины τ_{cp}^e . Для каждого значения Δ_i определяем основные параметры распределения – дисперсию, среднее квадратическое и эксцесс. Результаты расчета сводим в таблицу 2. Рассмотрим выборку, имеющую наибольший разброс данных, которая дает заниженную оценку τ_{cp2}^e с дисперсией D_2 .

Таблица 2

Влияние значений Δ_{cp} на параметры распределения случайной величины

Δ_{cp} , МПа	Дисперсия, (МПа) ²	Среднее квадратическое, МПа	Эксцесс
0	2,065	1,44	-0,88
0,1	1,838	1,356	-0,88
0,2	1,85	1,36	-0,86
0,3	1,86	1,364	-0,83
0,4	1,905	1,38	-0,8
0,5	1,92	1,386	-0,756
0,6	1,94	1,393	-0,7
0,7	1,97	1,403	-0,69
0,8	2,01	1,42	-0,65

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что по мере возрастания величины Δ_{cp} дисперсия, среднее квадратическое и абсолютное значение эксцесса постепенно увеличиваются. При некотором значении Δ_{cp} величина дисперсии достигает первоначального уровня $D = D_2$. При этом эксцесс не превышает значения, предусмотренного выражением (2). Величину параметра Δ_{cp} , соответствующую этому значению дисперсии, следует принять за наиболее вероятную. Тогда по формуле (4) получим уточненную оценку предела прочности $\tau_{cp, ут}^e = 15,0$ МПа. Таким образом, погрешность оценки этой величины благодаря предложенной методике статистической обработки уменьшилась с 0,3 до 0,1 МПа, т.е. в 3 раза.

При других вариантах исходной выборки были также получены более точные оценки предела прочности паяных соединений. Погрешность оценки уменьшалась в 1,4...1,8 раза.

При уменьшении числа параллельных опытов необходимость в уточнении результатов, получаемых в экспериментах с попарным нагружением, возрастает. Чтобы показать это уменьшим число элементов в рассматриваемой выборке до восьми. Получим следующую совокупность чисел: 15,5; 13,8; 17,8; 13,5; 14,2; 16,7; 14; 13. Для нее определим среднее значение предела прочности $\tau_{cp}^e = 14,81$ МПа, дисперсию $D = 2,861$ и среднее квадратическое отклонение $s = 1,691$. При попарном нагружении и максимальной погрешности результаты испытаний образцов с двумя одинаковыми паяными швами запишутся в виде следующей выборки из 4-х элементов: 13; 13,5; 13,8; 14. При обработке этих данных получим: $\tau_{cp1}^e = 13,575$ МПа; $D_1 = 0,589$; $s = 0,768$. Как видим, погрешность оценки составляет 8,3 %. Для этой выборки также определим уточненное значение предела прочности путем последовательного увеличения значений параметра Δ_{cp} . Результаты расчетов сводим в таблицу 3, которая является аналогом таблицы 2.

При $\Delta_{cp} = 1,3$ МПа среднее квадратическое отклонение составляет 0,803 МПа, что всего на 4,6 % превышает этот показатель для исходной выборки. Поэтому для расчета уточненного значения показателя прочности используем $\Delta_{cp} = 1,3$ МПа и получаем $\tau_{cp, ут}^e = 14,225$ МПа. Таким образом, погрешность оценки, обусловленная попарным нагружением паяных швов, снизилась с недопустимо большой величины (8,3 %) до вполне приемлемого значения (3,95 %).

Таблица 3

Определение уточненного значения предела прочности при уменьшении объема выборки

Δ_{cp} , МПа	Дисперсия, (МПа) ²	Среднее квадратическое, МПа	Эксцесс
0	0,589	0,768	-0,036
0,1	0,162	0,406	-1,045
0,5	0,234	0,484	-0,212
0,8	0,345	0,587	-0,339
1,2	0,573	0,757	-0,963
1,3	0,645	0,803	-1,11

Для окончательного решения вопроса о возможности применения предлагаемой методики статической оценки результатов механических испытаний нами была проведена экспериментальная проверка, которая заключалась в сравнении результатов испытания двух партий паяных образцов медь-медь, паянных припоем ПОС 40. Технологические процессы пайки для образцов обеих партий были одинаковыми, а различие между ними заключалось только в количестве одновременно испытываемых паяных швов. Форма и размеры образцов показаны на рисунке 4.

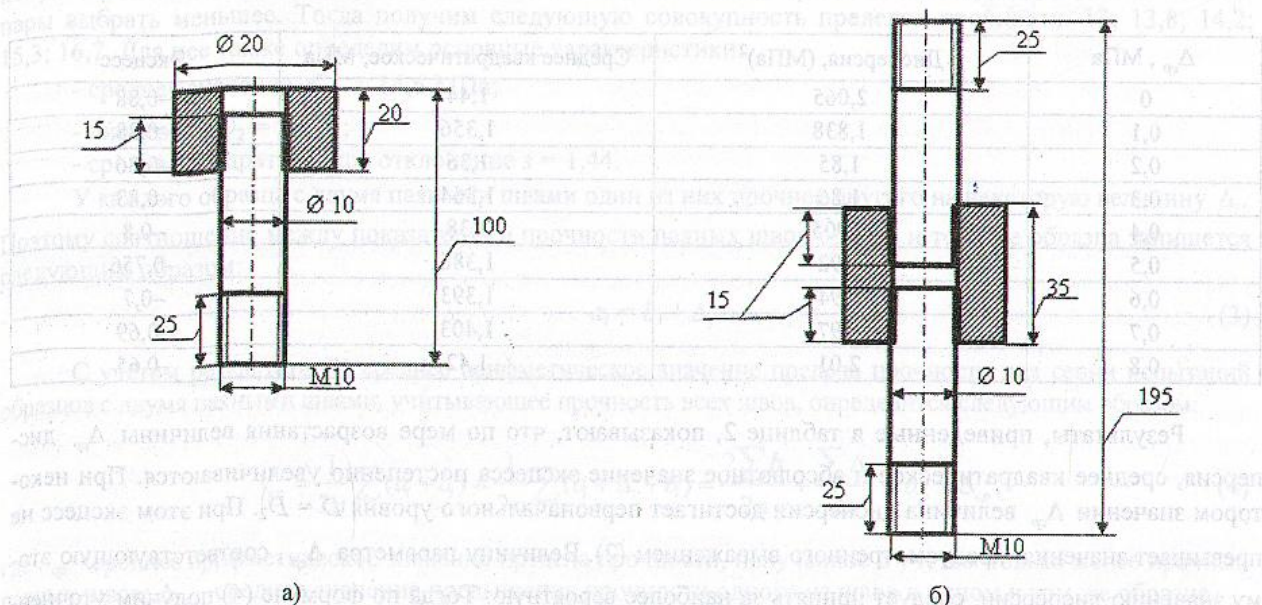


Рис. 4. Конструкции образцов для испытания паяных соединений на статическую прочность при растяжении: а – телескопического; б – муфтового

Механические свойства паяных соединений определяли при растяжении их на машине МР-0,5-1 со скоростью нагружения 18...20 мм/мин.

Образцы первого типа (см. рис. 4, а) имели следующие значения пределов прочности на срез: 42,8; 50,4; 42,06; 39,2; 40,06, среднее значение для которых составляло $\tau_{срм}^0 = 42,904$ Па при дисперсии $s_m^2 = 19,68$.

Для образцов муфтового типа (см. рис. 4, б) были получены другие значения пределов прочности: 42,39; 40,5; 41,22; 37,4; 38,81. При этом среднее значение составляло 40,064 МПа, а дисперсия $s_m^2 = 3,9$.

Приведенные данные показывают, что образцы с двумя одновременно испытываемыми паяными швами действительно обладают меньшей величиной предела прочности при меньшем разбросе экспериментальных данных.

Проведем статистическую обработку показателей прочности образцов первого типа и определим теоретическое значение предела прочности при попарном их нагружении. Максимальная оценка этого показателя $\tau_1 = \frac{42,8 + 40,06}{2} = 41,43$ МПа. Минимальная оценка $\tau_2 = \frac{39,2 + 40,06}{2} = 39,63$ МПа.

Тогда наиболее вероятное значение оценки предела прочности в случае попарного нагружения

$$\tau_m = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = 40,53 \text{ МПа.}$$

Расхождение с результатом эксперимента составит:

$$\delta = \frac{40,53 - 40,064}{40,064} \cdot 100 \% = 1,2 \%$$

Таким образом, предлагаемая методика оценки экспериментальных данных с высокой степенью точности предсказывает результаты для попарного нагружения образцов по данным испытания образцов с одним паяным швом.

Рассмотрим, насколько эффективно предлагаемая методика решает обратную задачу, оценивая результаты для образцов с одним паяным швом по результатам попарного нагружения. Увеличивая постепенно величину Δ_{cp} начиная с нулевого значения и определяя для каждого значения дисперсии, как это предусмотрено предлагаемой методикой, получим данные (табл. 4), аналогичные приведенным в таблице 3.

Таблица 4

Результаты расчета величины Δ_{cp} по результатам эксперимента

Δ_{cp} , МПа	Дисперсия, (МПа) ²	Среднее квадратическое, МПа
0	3,46	1,86
0,2	3,48	1,865
0,4	3,51	1,87
0,8	3,64	1,91
1,2	3,86	1,96
1,5	3,937	1,98

Тогда, принимая $\Delta_{cp} = 1,5$, определим оценку предела прочности для образцов телескопического типа:

$$\tau_m = \frac{\sum [\tau_i + (\tau_i + \Delta_{cp})]}{2n} = 41,81 \text{ МПа.}$$

Отличие от экспериментального результата составляет

$$\delta = \frac{42,904 - 41,81}{42,904} \cdot 100 \% = 2,55 \%$$

Заключение. Предложенную методику статистической оценки показателей прочности паяных соединений можно рекомендовать для более достоверного и корректного сравнения результатов, полученных при испытании образцов различных типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лашко, Н.Ф. Пайка металлов / Н.Ф. Лашко, С.В. Лашко. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
2. Гржимальский, Л.Л. Технология и оборудование пайки / Л.Л. Гржимальский, И.И. Ильевский. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.
3. Соединения паяные. Методы испытаний на усталость: ГОСТ 26446-85. – Введ. 22.01.85 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 23 с.
4. Цумарев, Ю.А. Образцы для определения циклической прочности паяных соединений методом изгиба с вращением / Ю.А. Цумарев, И.В. Тарасенко // Сварочное производство. – 2004. – № 2. – С. 17–18.
5. Образец для испытания паяных соединений на циклическую прочность: пат. 6822(C1), (BY), МПК G 01. – № 3/32 / Е.Ю. Латыпова, Ю.А. Цумарев, Н.А. Леванович, И.В. Тарасенко; заявл. 8.08.2000; опубл. 30.03.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
6. Составной образец для определения циклической прочности паяных соединений: пат. Респ. Беларусь 6996 (C1), (BY), МПК G 01 N 3/32 / И.В. Тарасенко, В.П. Березиенко, Е.Ю. Латыпова, Ю.А. Цумарев; заявл. 1.06.2000; опубл. 30.12.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
7. Паяный образец для испытания на циклическую прочность: патент № 2724 (U), (BY), МПК G 01 N 3/32 / Е.Ю. Латыпова; заявл. 10.10.2005; опубл. 30.06.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005.
8. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

Поступила 28.11.2008