

- компьютере // Науч. тр. ДонГТУ. Сер. Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем. Донецк. 1999. Вып. 10. С. 20–25.
7. *Фельдман Л.П.* Сходимость и оценка погрешности параллельных одношаговых блочных методов моделирования динамических систем с сосредоточенными параметрами // Науч. тр. ДонГТУ. Сер. Информатика, Кибернетика та обчислювальна техніка. Донецк, 2000. Вып. 15. С. 34–39.
 8. *Feldmann L.P.* Implementierung und Effizienzanalyse von parallelen blockartigen Simulationsalgorithmen für dynamische Systeme mit konzentrierten Parametern. In: Möller, D.P.F. (Hrsg.): Tagungsband 14. ASIM-Symposium Simulationstechnik in Hamburg, September 2000, SCS-Europe BVBA, Ghent/Belgium 2000. S. 241–246.
 3. *Фельдман Л.П., Дмитриева О.А.* Разработка и обоснование параллельных блочных методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений на SIMD-структурах // Науч. тр. ДонГТУ. Сер. Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем. Донецк, 2001. вып. 29с. 70–79.
 10. *Feldman L.P., Dmitrieva O.A., Gerber S.* Abbildung der blockartigen Algorithmen auf Parallelrechnerarchitekture. In: Tavangarian,D., Grützner,R. (Hrsg.): Tagungs-band 15. ASIM-Symposium Simulationstechnik in Rostock, September 2002, SCS-Europe BVBA, Ghent/Belgium 2002. P.359–364.

Ю.И.Рогозов, Ю.Ф.Кутенкова

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Изучение состояния вегетативной нервной системы (ВНС), а также причин возникновения и клинических проявлений вегетативных расстройств является одной из актуальных проблем современной медицины. Поскольку живой организм является иерархической системой и все его подсистемы взаимодействуют друг с другом, то нарушения в одной подсистеме неизбежно влекут изменения параметров или режимов деятельности других подсистем. Другой особенностью вегетативных расстройств является их вторичное возникновение на фоне многих психических, неврологических и соматических заболеваний [1]. Для исследования ВНС можно использовать частоту и ритмичность сердцбиений, а также ряд других параметров используемых методов оценки.

Под вариабельностью сердечного ритма (ВСР) понимается изменчивость продолжительности между последовательными циклами сердечных сокращений. Расстояние между кардиоциклами определяется по продолжительности межсистолических интервалов – RR (рис. 1). Вариабельность интервалов RR обусловлена физиологическими циклическими колебаниями сердечного ритма, связанными с изменениями состояния отделов ВНС.

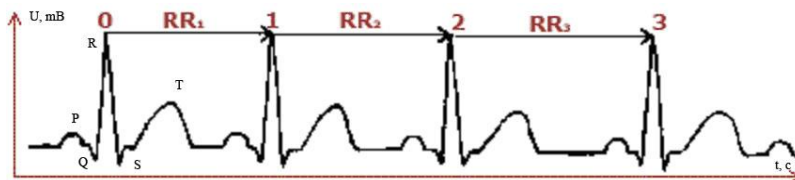


Рис. 1. Кардиоциклы

Деятельность сердца сопровождается перераспределением электрического потенциала на теле человека. Временная зависимость этих потенциалов называется электрокардиограммой (ЭКГ), которая имеет ряд характерных участков различной длительности.

Очень важным условием получения корректных результатов является продолжительность записи кардиосигнала. В настоящее время общепринятым стандартом длительности регистрации кардиосигнала является 5-минутная запись.

Среди имеющихся методов анализа variability сердечного ритма можно выделить следующие:

- анализ пространственно-временной области:
 - статистический метод;
 - геометрические методы (гистография и скаттерография);
- анализ в частотной области.

Дадим характеристику каждого из указанных подходов.

1. Пространственно-временная область.

Статистический метод

Статистический анализ основан на подсчете изменений длительности последовательных интервалов RR с вычислением различных коэффициентов и показателей. Поскольку измерению подлежат только интервалы RR между комплексами синусового происхождения, то такие интервалы принято обозначать сокращением NNI – Normal to Normal Interval (рис. 2).

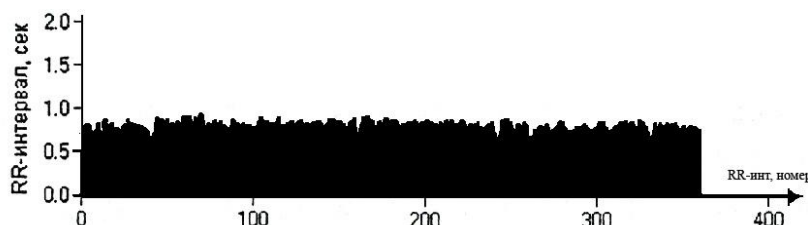


Рис. 2. Построение кардиоинтервалограммы

При статистической обработке пятиминутных отрезков получают следующие показатели: средняя длительность RR-интервала, (связанная с частотой сердечных сокращений как $ЧСС = 60/\overline{RR}$) и его среднеквадратичное отклонение (SDRR).

При 24-часовой записи часто используют SDARR – среднеквадратичное отклонение величин \overline{RR} , вычисленных по 5-минутным интервалам и SDRRindex – среднее значение стандартных отклонений по тем же интервалам. Также используются статистические характеристики более высоких порядков: асимметрия (As) и эксцесс (Ex). Однако они не получили большого распространения [2].

При анализе разностей длительностей последовательных RR-интервалов используют следующие показатели:

NN50 count – количество последовательных пар RR-интервалов, различающихся более чем на 50 мс;

pNN50 (%) – процент NN50 от общего размера выборки;

RMSSD – квадратный корень из суммы квадратов разностей последовательных RR интервалов;

SDSD – стандартное отклонение разностей соседних RR-интервалов.

Формулы расчета содержатся в [3].

В практических исследованиях многими учеными были предложены различные численные характеристики нормальных значений для вышеописанных показателей, однако единого стандарта до сих пор нет.

Гистография

Гистография, или вариационная пульсометрия. В основе метода лежит построение гистограммы распределения изучаемого ряда интервалов RR. По оси абсцисс откладывают значения длительностей интервалов, а по оси ординат – количество интервалов RR с соответствующим значением их длительностей (рис. 3).

По форме гистограммы определяют:

- моду (М) – наиболее часто встречающееся значение RR-интервала, соответствует максимуму гистограммы;
- амплитуду моды (АМ) – количество RR-интервалов, соответствующих моде;
- вариационный размах (ВР) – ширина гистограммы на определенном уровне (например, АМ/2), иногда ВР рассчитывают по основанию гистограммы после аппроксимации её треугольником;
- треугольный индекс (ТИ) – отношение общего количества RR-интервалов к амплитуде моды: $ТИ = \Sigma(RR)/AM$;
- индекс напряжения (ИН, по Баевскому) – отношение амплитуды моды к её значению: $Сн = AM / (2 \cdot \Delta x \cdot M)$, где Δx – разница между наибольшим и наименьшим значениями RR-интервалов в выборке, для расчета ИН используют ширину выборки 50 мс.

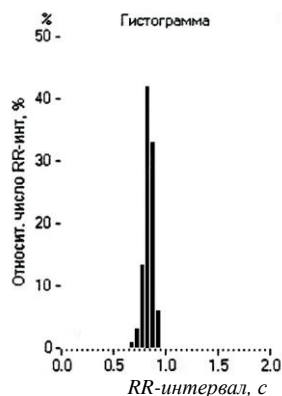


Рис. 3. Построение гистограммы

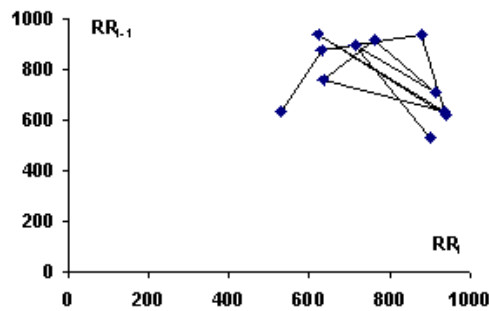


Рис. 4. Построение скаттерограммы

Скаттерография

Скаттерография – это графическое изображение пар RR-интервалов (предыдущего и текущего) на двумерной плоскости, отражающая зависимость пар последовательно идущих RR-интервалов. Для построения скаттерограммы по оси абсцисс откладывают текущее значение RR-интервалов, а по оси ординат – предыдущее (либо разницу между предыдущим и текущим) (рис. 4.). Скаттерограмму анализируют визуально либо применяют методы нелинейной динамики.

2. Частотная область.

Частотный анализ ВСП предполагает обработку динамического ряда RR интервалов спектральными методами, позволяющими выделить волновую структуру сердечного ритма. По 2–3 компонентам спектра можно сделать заключение о балансе активности симпатического и парасимпатического отделов ВНС. С этой целью чаще всего используется «дискретное преобразование Фурье» (ДПФ).

Спектральный метод применяется для выявления характерных циклических периодов в динамике RR-интервалов. Оценивается так называемая спектральная мощность колебаний, соответствующая вкладу тех или иных периодических составляющих в динамику изменений ритма. Последнее время работа может идти в

реальном масштабе времени, выделяются на пятиминутных отрезках ритма три главных компонента:

HF – high frequency – быстрые (дыхательные) волны (частота 0,15–0,40 Гц);

LF – low frequency – медленные волны (частота 0,04–0,15 Гц);

VLF – very low frequency – очень медленные волны (частота 0,003–0,15 Гц).

Определяется также общая мощность спектра, характеризующая суммарное воздействие симпатического и парасимпатического отделов ВНС (Total Power – TP). TP равна сумме мощностей спектров во всех диапазонах. Волновые составляющие ритма оцениваются в виде мощности определенного частотного диапазона (в мс^2) или представляются в виде нормализованных единиц (пи). Последние позволяют представить вклад тех или иных частот в общую мощность спектра и выражаются в процентах к общей мощности (TP).

Мощность высокочастотных волн HF рассчитывается по формуле

$$\text{HF (nu)} = (\text{HF}/(\text{TP} - \text{VLF})) \times 100.$$

Мощность в диапазоне низких частот рассчитывается по формуле

$$\text{LF (nu)} = (\text{LF}/(\text{TP} - \text{VLF})) \times 100.$$

По данным спектрального анализа рассчитываются также показатель централизации (Index of centralization – IC) и индекс вагосимпатического взаимодействия (ИВСВ): $\text{IC} = (\text{HF} + \text{LF})/\text{VLF}$ и $\text{ИВСВ} = \text{LF}/\text{HF}$

Пусть для стационарного эргодического случайного процесса имеется некоторая неограниченной протяженности реализация $x(t)$, сконструируем из нее финитную функцию $x_T(t) = x(t)$ на протяжении времени $(-T/2 < t < T/2)$, тождественно равную 0 вне этого диапазона. Тогда спектральная плотность мощности определяется как средняя мощность за бесконечно большой промежуток времени:

$$W_x(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\dot{X}_T(\omega)|^2}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2,$$

где $\dot{X}_T(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-i\omega t} dt$ – текущий спектр процесса $x(t)$ на интервале $[-T/2; T/2]$.

Согласно теореме Виннера-Хинчина, спектр мощности $W_x(\omega)$ связан с автокорреляционной функцией стационарного процесса $R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt$ через преобразование Фурье (ПФ):

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega, \quad W_x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau,$$

для того что бы несобственный интеграл сходился, необходимо выполнение следующего условия:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt = \overline{x^2(t)} = \sigma^2, \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{S_T^2(\omega)}{T} = W_x(\omega).$$

Последовательность RR-интервалов является дискретным сигналом, поэтому справедливо представление

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} RR_n \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn},$$

где RR_n – исходная последовательность, N – размер выборки, X_k – дискретные отсчеты спектра. Для реальных сигналов, равномерно дискретизированных и зарегистрированных на участке $[-T_c/2; T_c/2]$, расстояние между отсчетами дискретного спектра равно $\Delta\omega = 2\pi/T_c$. Таким образом, k -й гармонике спектра X_k будет соответствовать частота (k/T_c) Гц, где T_c – длительность анализа. Выборочная спектральная плотность мощности (СПМ) последовательности RR -интервалов, называемая также периодограммой, определяется как квадрат модуля ДПФ:

$$\tilde{P}_{xx}(f) = |X(f)|^2.$$

ДПФ обладает всеми свойствами ПФ, поэтому для него также справедлива теорема Винера–Хинчина, согласно которой СПМ можно определить как ДПФ от корреляционной функции сигнала.

Следует иметь в виду, что по конечной выборке можно провести только оценку истинного спектра мощности изучаемого процесса. Действительно, для сигнала $s(t)$, известного на конечном отрезке времени $[-T/2; T/2]$, можно рассчитать спектр мощности. Если теперь рассмотреть результат обратного ПФ от текущего спектра, то он будет совпадать с исходным сигналом на отрезке $[-T/2; T/2]$ и равняться нулю вне этого отрезка, что может быть представлено как произведение исходного (бесконечного) сигнала на прямоугольное окно $\Pi(0; T)$:

$$S_T(t) = \begin{cases} S(t) & t \in [-T/2, T/2] \\ 0 & t \notin [-T/2, T/2] \end{cases}, \quad S_T(t) = S(t) \cdot \Pi(0; T),$$

$$\text{где } n(0, T) = \begin{cases} 1, & t \in [-T/2, T/2] \\ 0, & t \notin [-T/2, T/2] \end{cases}$$

Из свойств ПФ известно, что спектр произведения двух сигналов является сверткой их спектров, т.е. выборочный (текущий) спектр является сверткой истинного спектра случайного процесса и спектра прямоугольного окна

$$\dot{S}_T(\omega) = 1/2\pi \dot{S}(\omega) \otimes S_{\Pi}(\omega) = 1/2\pi \dot{S}(\omega) \otimes [T \cdot \text{Sinc}(\omega T/2)].$$

Результатом такой свертки является бесконечное число медленно убывающих (со скоростью порядка $1/\omega$) боковых гармоник, называемых также боковыми лепестками. Тем самым создается искажение в сигнале, что влияет на точность оценок результата. Помимо этого, выбор произвольного значения параметра T определяет конечную точность и достоверность результата, поскольку сигнал может быть и нестационарным.

Рассмотрим проблему смещения выборочного спектра с точки зрения теоремы Винера–Хинчина. Оценка автокорреляционной функции $\tilde{R}_{xx}(\tau)$ по конечному интервалу T является смещенной, т.е. её математическое ожидание равно истинной автокорреляционной функции (АКФ), умноженной на треугольное окно Бартлетта:

$$E[\tilde{R}_{xx}(\tau)] = R_{xx}(\tau) \left(1 - |\tau|/T\right), \quad P_{xx}(f) = T \sum_{m=-\infty}^{+\infty} r_{xx}[m] e^{-i2\pi f m T},$$

$$r_{xx}[m] = M\{[n+m]x^*[n]\},$$

где m и n – индекс времени.

Тем не менее, при $T \rightarrow \infty$ математическое ожидание оценки АКФ стремится к истинной автокорреляционной функции, т.е. оценка является асимптотически

несмещенной. То же самое можно сказать и об оценке спектральной плотности мощности $P_{xx}(f)$, которая связана с АКФ через ПФ. В [4] показано, что хотя при увеличении N математическое ожидание $P_{xx}(f)$ стремится к истинной СПМ, однако дисперсия стремится не к нулю, а к некоторой конечной величине, пропорциональной квадрату истинной СПМ $D(P_{xx}(f))|_{N \rightarrow \infty} = P_{xx}^2(f) \cdot const$ (т.е. выборочный спектр не является состоятельной оценкой СПМ). Это означает, что случайная погрешность в определении амплитуды некоторой гармоники не убывает при увеличении числа членов исходной последовательности, поэтому необходимы специальные методы для получения состоятельных оценок спектра.

При использовании перечисленных выше методов появляются следующие трудности:

- для анализа по предложенным методам сигнал должен быть стационарным эргодическим случайным процессом;
- при использовании статистических методов, как правило, пользуются одной временной реализацией случайной функции истинного стохастического процесса, что приводит к необходимости использовать лишь косвенные методы оценки параметров биологических систем. Для совместного анализа многих реализаций надо знать точное текущее состояния объектов наблюдения и представляется невозможным воссоздать условия эксперимента;
- при нарушении условия стационарности использование спектрального метода оценки динамики сигнала дает неубывающую случайную погрешность результата, что требует поиска других состоятельных оценок. Очень большое влияние на оценку спектра оказывает выбор отсчета.

Для получения максимальной точности анализа необходимо иметь бесконечное число реализаций случайной функции, что на практике неосуществимо.

Другой подход к анализу variability сердечного ритма заключается в использовании методов нелинейной динамики.

Для проведения фрактального метода исследования состояния биологических систем необходимо решить несколько задач, и самая важная из них – это задача о реконструкции анализируемого сигнала по одной временной реализации.

В первую очередь следует классифицировать объект анализа как систему с вытекающими из этого свойствами [5]:

- 1) имеется ряд взаимосвязанных биологических подсистем, которые своим функционированием могут вносить корректировку в общую работу ВНС;
- 2) для системы может быть задан оператор эволюционирования, который определяет динамику развития состояния ВНС;
- 3) в процессе динамики системы могут возникать бифуркации в пространстве параметров, что влечет различные масштабные факторы, влияющие на оператор эволюционирования системы.

В основе реконструкции аттрактора лежит теорема Такенса [6], которая говорит о том, что восстановленный аттрактор топологически будет подобен истинному.

Процесс реконструирования можно представить следующим образом.

Пусть имеется временной ряд экспериментальных данных, представляющий собой отсчеты некоторой физической величины: $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$. Если известен шаг по времени Δt , то время $t = k * \Delta t$. Величина s является одной из переменных динамической системы. Система находится в стационарном режиме, т.е. фазовая траектория проходит внутри аттрактора. Для восстановления аттрактора Такенс предложил метод временной задержки координат. В n -мерном фазовом пространстве строится последо-

вательность точек вида $x_k = (s_k, s_{k+\tau}, \dots, s_{k+(n-1)\tau})$, $k = \overline{0, m-1}$, $m = M - (n-1)\tau$, здесь τ – временная задержка, n – размерность вложения.

Основной результат Такенса состоит в следующем. Если $M \rightarrow \infty$, то множество точек $x_k \in R^n$ задает вложение исходного аттрактора почти при любом выборе наблюдаемой переменной, если n не меньше удвоенной размерности исходного аттрактора. Для оценки характеристик реального исследуемого аттрактора можно вычислять характеристики восстановленного аттрактора. С целью уменьшения ошибки, обусловленной конечностью набора экспериментальных точек $\{s_k\}_{k=0}^{M-1}$, необходимо проводить расчеты при нескольких различных значениях M и n и добиваться независимости получаемых оценок характеристик от M и n в пределах заданной точности.

Экспериментальные данные, получаемые при анализе ритма сердца, говорят о том, что в системе нет установившегося режима функционирования, но есть диссипация. Поэтому можно предположить, что функционирование биологической системы подразумевает под собою движение в фазовом пространстве по странному аттрактору.

Размерность странного аттрактора является фрактальной. При этом все траектории внутри странного аттрактора динамически неустойчивы, что выражается в сильной расходимости близких в начальный момент траекторий. Странный аттрактор характеризуется глобальным сжатием фазового объема. Задача анализа состояния ВНС состоит в определении, в каком режиме движения находится текущая точка и как происходит разбегание соседних траекторий. Используя максимальный характеристический показатель Ляпунова, можно сделать вывод о том является ли данный режим регулярным или хаотическим. Обратная величина определяет время перемешивания, т.е. за какое время система расплывется по странному аттрактору или время предсказания состояний системы.

Заключение

Результаты анализа можно свести в таблицу.

Метод Параметры	Статистический	Кардио-интервало-графия	Гисто-графия	Скаттеро-графия	Частотный	Фрактальный
Стационарный изгродический процесс	+	+	+	частично	+	–
Количество временных реализаций наблюдаемого сигнала	несколько	несколько	несколько	одна	несколько	одна
Точность оценки состояния биологической системы	Зависит от количества временных реализаций	Зависит от количества временных реализаций	Зависит от количества временных реализаций	Оценка визуальная или расчет пар-ров	Зависит от количества временных реализаций	Позволяет оценить и предсказать динамику состояния биологической системы

Фрактальный анализ состояния биологической системы и оценка ее параметров позволяют избежать перечисленных выше ограничений и трудностей. Для расчета параметров динамической системы необходимо и достаточно знать параметры порядка системы и ее структуру. Определение и использование таких параметров, как фрактальная и информационная размерности, ляпуновские показатели, энтропия Колмогорова–Синяя, фазовый объем, позволяют производить более глубокий ана-

лиз текущего состояния биологической системы, определять переходные процессы и делать оценку поведения системы в будущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заболевания вегетативной нервной системы. Руководство для врачей/ Под ред. проф. А.М. Вейна – М.: Медицина. 1991.
2. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М., 1962.
3. *Земцовский Э.В., Тихоненко В.М., Реева С.В., Демидова М.М.* Функциональная диагностика состояния вегетативной нервной системы. С-Пб., 2004.
4. *Марпл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.
5. *Стюарт И.* Играет ли Бог в кости? Математика хаоса.
6. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Современные проблемы нелинейной динамики. 0150М. Эдиториал УРСС, 2000.

А.А. Зори, В.Д. Корнев, М.Г. Хламов, Р.З. Амиров

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ УЧЕТЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Постоянный рост цен на энергоносители приводит к удорожанию тепловой энергии, которая используется в системах теплоснабжения производственных и жилых помещений. Поэтому повышение точности измерения тепла, отпускаемого потребителям, является актуальной задачей.

Инструментальный учет тепловой энергии требует регулярного измерения температуры теплоносителя в трубопроводах системы теплоснабжения. Бытует мнение, что все проблемы измерения температуры при учете тепловой энергии решены. Однако это далеко не так. Анализ показывает, что систематическая составляющая погрешности измерения температуры и перепада температур между подающим и обратным трубопроводами, особенно в условиях малых значений перепада, вносит существенный вклад в инструментальную погрешность учета тепловой энергии.

В теплосчетчиках расчет тепла и массы теплоносителя с заданной точностью в большинстве случаев выполняется по формулам [1]

$$G = \int_{t1}^{t2} Q_0 k (T_1 - T_2) dt, \quad M = \int_{t1}^{t2} Q_0 \rho dt,$$

где Q_0 – объемный расход теплоносителя;

T_1 и T_2 – значения температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах;

k – тепловой коэффициент (коэффициент Штюка), который зависит от параметров теплоносителя и места установки расходомера – на трубе прямой или обратной подачи воды;

ρ – плотность теплоносителя.

В качестве измерителей температуры в теплосчетчиках нашли широкое применение платиновые термометры сопротивления (ТС), допускаемая погрешность преобразования температуры у лучшего класса точности которых нормируется по ГОСТу выражением $\Delta_d = \pm(0,15+0,002|T|)$. При перепаде температур $\Delta T \approx 10$ °С и температуре теплоносителя в подающем трубопроводе $T_1 \approx 80$ °С, допускаемая составляющая погрешности измерения разности температур может достигать $\pm 0,5$ °С, что эквивалентно погрешности по измерению тепла в ± 5 % в закрытой системе теплоснабжения. В то же время вклад составляющей по измерению расхода теплоносителя в современных теплосчетчиках не превышает ± 1 %.