

E-mail: q256@mail.ru.  
347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 99, тел.: (8634)614016.  
Старший программист.

**Lebed Sergey Ivanovitch**  
JSC "SDO "Ritm".  
E-mail: q256@mail.ru.  
99, Petrovskaya str, Taganrog, 347900, Russia, Phone: (8634)614016.  
Senior programmer.

УДК 612.172.4

**С.М. Руденко**

**ТОЧНЫЕ НЕИНВАЗИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН  
ГЕМОДИНАМИКИ И КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИЙ СЕРДЦА И  
СОСУДОВ В ФАЗАХ СЕРДЕЧНОГО ЦИКЛА**

*В статье рассматривается возможность измерения параметров гемодинамики – объемы крови, перекачиваемые сердцем в различные фазы сердечного цикла.  
Сердце; сосуды; гемодинамика; ЭКГ; реограмма.*

**S.M. Rudenko**

**EXACT NONINVASIVE MEASUREMENTS OF THE BASIC SIZES OF  
HAEMODYNAMICS AND QUALITY STANDARD OF FUNCTIONS OF  
HEART AND VESSELS IN PHASES OF THE WARM CYCLE**

*In article possibility of measurement of parametres of haemodynamics – the volumes of blood which are pumped over by heart in various phases of a warm cycle is considered.  
Heart; vessels; haemodinamycs; ECG; rheogram.*

Кардиологов давно интересовала возможность измерения параметров гемодинамики. Особенно важно знать объемы крови, перекачиваемые сердцем в различные фазы сердечного цикла. Если знать какие объемы крови перекачивают отделы сердца в различные фазы, то можно с высокой точностью диагностировать самые тончайшие изменения, происходящие в сердечно-сосудистой системе, не только при патологии, но и в норме. Ранее объемы крови можно было измерить только путем катетеризации крупных артерий. Позже появилась возможность измерять ударный объем крови с помощью ультразвуковых сканеров. Однако возможность измерять объемы крови входящие и выходящие в отделы сердца и транспортируемые сосудами в каждой из фаз сердечного цикла оставалась только мечтой. Этому мешало несовершенство теории гемодинамики.

С начала 1980 г. группа ученых интенсивно занималась фазовым анализом сердечного цикла [1]. Были известны результаты других исследований [2], которые близко подошли к построению адекватной модели гемодинамики. Однако предлагаемые теории на практике не подтверждались. Было ясно, что необходимо точно установить биофизические процессы формирующие кровоток и на практике добиться измерения их основных параметров. Ответы на поставленные вопросы удалось найти при исследовании сердца с помощью фазового анализа сердечного

цикла, синхронно зарегистрированных электрокардиограммы и реограммы с восходящей аорты [3].

Исследование гемодинамических процессов в системе кровообращения было осуществлено на принципиально новой научной основе, на концепции о движении крови по сосудам в «третьем» режиме. Первые теоретические и экспериментальные исследования в области гидродинамики, приведшие к разработке теории «третьего» режима течения жидкости, были осуществлены Г.М. Поединцевым более 30 лет назад [1]. Было установлено, что в тончайшем пограничном слое жидкости в момент возникновения движения из состояния покоя зарождается пакет концентрических волн трения, которые распространяются от стенки трубы к ее центру. Схематично это показано на рис. 1.

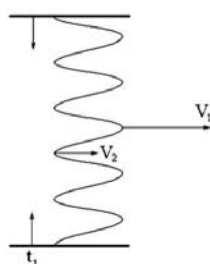


Рис. 1. Формирование бегущих волн трения при возникновении движения жидкости в трубе

Достигая оси потока, волны исчезают. В длинной трубе при докритических числах Рейнольдса этот процесс продолжается лишь доли секунды, до того момента, пока не исчезнут все волны трения, кроме расплывшейся пристеночной волны. В итоге, нестационарное течение жидкости переформируется в стационарное течение Гагена – Пуазейля (ламинарное).

Таким образом, при возникновении движения жидкости в трубе в течение очень короткого времени имеет место изменяющийся волнообразный профиль скорости, а в соответствии с законом Бернулли, и волнообразный профиль статического давления. Если в такой поток попадут взвешенные частицы, то поперечные градиенты статического давления вытолкнут их в слои с самым низким давлением, а согласно закону Бернулли, это будут слои с самой высокой скоростью движения. То есть произойдет структурирование потока движущейся жидкости. Есть и еще одна уникальная особенность – в этот период движение жидкости осуществляется с несравнимо меньшими потерями напора на трение, чем при установившемся ламинарном течении.

Был найден способ удержания в трубе режима движения жидкости со стоячим волновым профилем скорости и статического давления в течение неограниченного времени [1]. Это возможно осуществить лишь при пульсирующем режиме. Наиболее эффективным будет движение жидкости в пульсирующем режиме по эластичной трубе, причем скорость движения жидкости и радиус трубы должны изменяться в каждом импульсе по строго определенному закону. А именно:

$$r_t = r_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{1/5}, \quad W_t = W_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^{2/5},$$

где  $t_0 > 0, t > t_0$ ;

$r_t$  – текущий радиус расширения трубки;

$r_o$  – начальный радиус ( при  $t = t_o$  );

$t$  – текущее время;

$t_o$  – время разгона потока до максимальной скорости в импульсе;

$W_i$  – текущее значение скорости движения жидкости;

$W_o$  – максимальное значение скорости в импульсе (при  $t = t_o$ ).

Этот режим был назван «третьим» в отличие от двух известных режимов, турбулентного и ламинарного (пуазейлевского).

Именно в «третьем» режиме, а не в ламинарном (пуазейлевском), движется кровь по кровеносным сосудам [1, 3]. Он отличается существенно меньшими потерями напора на трение, а также волнообразным профилем скорости и статического давления, под воздействием которого поток крови в кровеносных сосудах расслаивается на чередующиеся концентрические скоростные слои, заполненные форменными элементами, и заторможенные слои, заполненные плазмой.

На основе теории «третьего» режима был разработан математический метод определения величин основных гемодинамических параметров. Они формируются фазовой работой сердца, точнее говоря, фазовой структурой сердечного цикла.

Для расшифровки фазовой структуры сердечного цикла были использованы синхронные записи электрокардиограммы и реограммы с восходящей аорты. Они представлены на рис. 2.

Принципиально важным является место регистрации этих сигналов. Активный электрод устанавливается на аорте, а второй в зоне верхушки сердца. Существенным отличием является то, что с электродов ЭКГ снимается синхронно и сигнал РЕО. Этот метод был назван точечной реографией. Реальные записи, полученные этим методом, представлены на рис. 3.

Для разработки критериев регистрации границ начала и конца фаз сердечного цикла на ЭКГ и РЕО, регистрируемых с тела человека, были использованы их производные [3]. Такой подход позволил автоматизировать процесс расшифровки фазовой структуры сердечного цикла.

Реализация на практике полученных теоретических результатов позволила по измеренным длительностям фаз сердечного цикла рассчитывать следующие объемные параметры гемодинамики:

SV – ударный объем крови, мл;

MV – минутный объем крови, л;

PV1 – объем крови, притекающий в желудочек сердца в фазу ранней диастолы, характеризующий присасывающую функцию желудочка, мл;

PV2 – объем крови, притекающий в левый желудочек сердца в фазу систолы предсердия, характеризующий сократительную функцию предсердия, мл;

PV3 – объем крови, изгоняемый желудочком сердца в фазу быстрого изгнания, мл;

PV4 – объем крови, изгоняемый желудочком сердца в фазу медленного изгнания, мл;

PV5 – объем крови (часть SV), перекачиваемый восходящей аортой как перистальтическим насосом, характеризующий тонус аорты, мл.

Одновременно можно дать качественную оценку следующим параметрам:

- функция клапана аорты;

- особенности анатомии клапана аорты;

- эластичность аорты;

- наличие сужения устья аорты;

- сократительная функция межжелудочковой перегородки;

- сократительная функция миокарда;

- состояние венозного кровотока;
- состояние функции легких;
- наличие стеноза крупных сосудов;
- наличие проблемы предынсультного состояния.

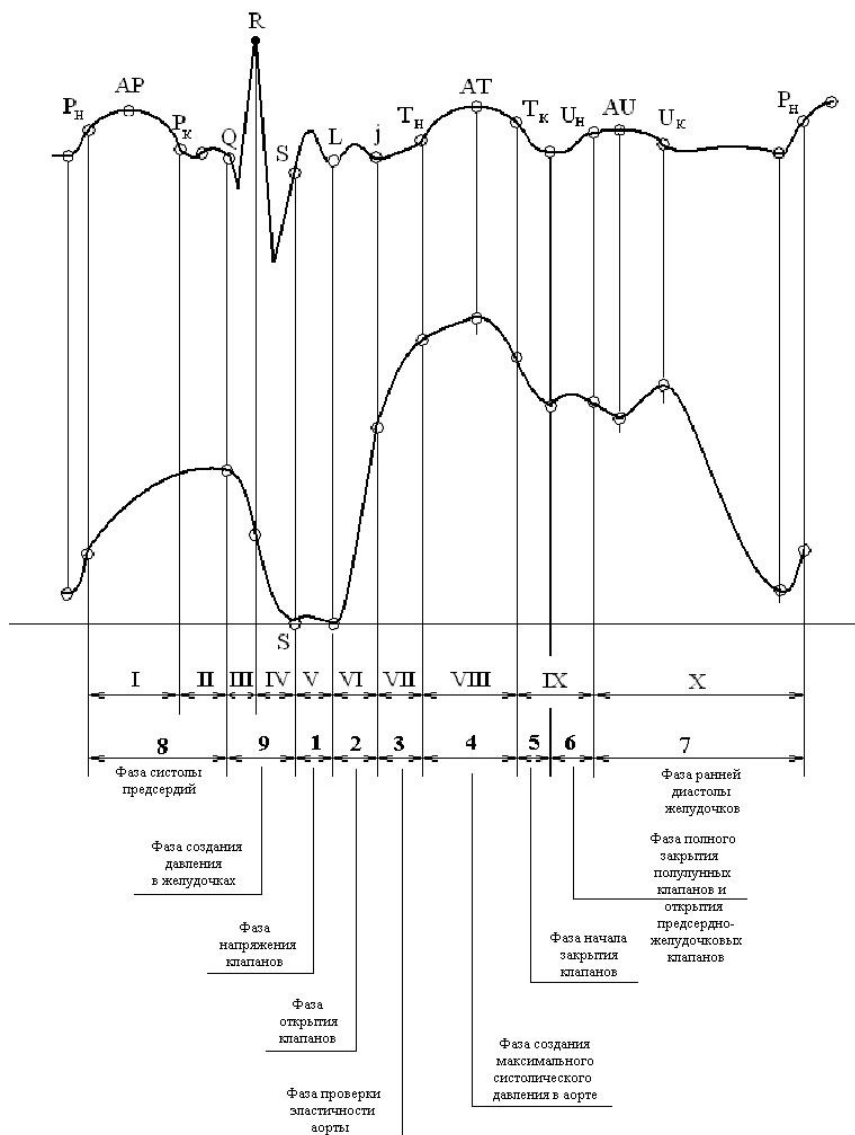


Рис. 2. Фазовые соотношения электрокардиограммы и реограммы восходящей аорты

Объемно-фазовый анализ функционирования системы кровообращения является принципиально новым методом исследования и дает новейшую информацию о всех ее аспектах как в норме, так и в патологии. Как показала практика, метод успешно конкурирует со всей совокупностью известных методов исследования, таких как электрокардиограф, ЭКГ по Холтеру, ультразвуковые методы, за

счет значительно большей информативности, простоты, экономической эффективности и доступности широкому кругу людей.



Рис. 3. ЭКГ + РЕО восходящей аорты, зарегистрированные у здорового молодого человека

С 2004 года, когда метод был внедрен в практику, после чего было обследовано около 3 000 пациентов. Полученные данные позволили по-новому взглянуть на существующую теорию функционирования сердечно-сосудистой системы и «закрыть белые пятна» в теории кардиологии.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Поединцев Г.М.* О режиме движения крови по кровеносным сосудам. Развитие новых неинвазивных методов исследования в кардиологии. – Воронеж, 1983. – С.17-35.
2. *Каро К., Педли Т., Шротер Р., Сид У.* Механика кровообращения. – М.: Мир, 1981. – 624 с.
3. *Руденко М.Ю., Зернов В.А., Поединцев Г.М.* Теоретические основы фазового анализа сердечного цикла. – М.: ИКМ, 2007. – 336 с.

#### **Руденко Сергей Михайлович**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: rudenko-serg@ya.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: (8634)371795.

Кафедра электрогидроакустической и медицинской техники, аспирант.

#### **Rudenko Sergey Mikhailovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University».

E-mail: rudenko-serg@ya.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia, Phone: (8634)371795.

Department of Hydroacoustic and Medical Engineering, post-graduate student.