

УДК 616.61-78:615.47

## Система контроля воздушных включений в плазме крови при гемодиализе

*С.В. Скорова, Н.А. Ефимова, В.В. Гривцов*

*Южный федеральный университет*

**Аннотация:** Разработка системы мониторинга крови в процессе гемодиализа предназначена для повышения безопасности проведения процедуры внепочечного очищения и предотвращения тяжелых последствий воздушной эмболии.

Процесс гемодиализа требует повышенного контроля таких параметров, как диализная доза, скорость перфузии крови, ультрафильтрация, объем крови, ее состав и т.д. Одной из важнейших составляющих гемодиализных аппаратов является система контроля воздушных включений (пузырьков воздуха), попадающих в кровь в случае нарушения техники проведения процедуры. Предлагается система гемодиализного мониторинга, основанная на использовании ультразвукового анализа. Ультразвуковой детектор воздуха неинвазивно устанавливается на венозной кровопроводящей магистрали, при выходе крови из диализатора, и определяет наличие в составе уже очищенной крови посторонних воздушных включений путем измерения скорости распространения ультразвука в анализируемой многофазной среде - крови, информируя таким образом врача о качестве и безопасности проводимой процедуры гемодиализа.

**Ключевые слова:** воздушная эмболия; ловушка воздуха; детектор воздушных включений; скорость ультразвуковых колебаний; метод синхрокольца.

Сегодня в мире гемодиализная терапия является единственным «источником жизни» для многих сотен тысяч больных с хронической почечной недостаточностью. Существующая тенденция расширения медико-технических требований к техническому оснащению диализной терапии, поиск новых возможностей аппаратной реализации, необходимость упрощения обслуживания и повышения надежности и автономности аппаратуры – все эти факторы определяют актуальность развития методик внепочечного очищения и их аппаратной реализации [1].

Воздушная эмболия, под которой понимают наличие движущегося сгустка воздуха в кровеносном сосуде, до сих пор является одним из самых серьезных осложнений при гемодиализе примерно в 10 - 20% проводимых процедур [2].

Конструктивно в отечественных и зарубежных кровопроводящих магистралях гемодиализных аппаратов предусмотрены ловушки воздуха, предназначенные для обнаружения и перехвата воздушных включений, которые могут случайно попасть в кровь при недостаточной герметичности соединений или нарушении заданных параметров гемодиализа. Непосредственно на ловушке устанавливается детектор воздуха, контролирующий наличие воздушных включений в крови. Под ловушкой находятся датчик уровня и наружный электромеханический зажим, срабатывающий при нарушении заданных параметров экстракорпоральной циркуляции. Внутри ловушки воздуха расположен сеточный фильтр, предотвращающий попадание мелких тромбов в систему циркуляции биожидкости [3]. Приведенная совокупность элементов образует систему контроля воздушных включений в крови и является важной частью безопасности параметров гемодиализа.

В настоящее время наиболее распространенными способами контроля крови в процессе гемодиализа является применение оптических и ультразвуковых детекторов [4].

Принцип действия оптических детекторов воздуха основан на измерении интенсивности светового потока, рассеянного частицами, взвешенными в контролируемом растворе – крови. Измеряя интенсивность рассеянного света при фиксированном угле измерения можно сделать вывод о концентрации взвешенных в растворе частиц, в частности воздушных скоплений [5]. Основной причиной, сдерживающей использование оптических детекторов, является тот факт, что они способны обнаруживать относительно крупные скопления воздушных пузырьков, объем которых составляет порядка 0,05 мл и более, оставляя при этом без внимания воздушные включения меньших объемов, не обеспечивая, таким образом, необходимую для данной системы контроля точность измерения.

---

В работе предлагается система контроля воздушных включений, основу которой составляет ультразвуковой детектор воздуха. На рисунке 1 представлена структурная схема разработанного ультразвукового детектора. Принцип работы основан на фиксации изменения скорости распространения ультразвуковой волны, проходящей через жидкость или газ, вследствие резких различий акустических сопротивлений этих сред [6]. За основу для разработки взят частотно-импульсный метод измерения скорости распространения ультразвука в исследуемой среде (метод синхрокольца). Данный метод обладает достаточно высоким быстродействием и обеспечивает необходимую точность измерения при работе с биологическими жидкостями [7].



Рис.1. - Структурная схема ультразвукового детектора воздуха

Ультразвуковой детектор воздуха состоит из двух частей: передающей и приемной. Расстояние между излучающим и приемным преобразователями

устройства (т.е. область анализа) составляет 22 мм. Передающая часть включает в себя задающий генератор, который формирует периодические импульсы с заданными параметрами, и выходной усилитель. Нагрузкой выходного усилителя является пьезоизлучатель. Резонансная частота колебаний составляет 2,5 МГц. Через время  $t \approx 14$  мкс, равное времени прохождения ультразвуковой волной анализируемой среды, сигнал поступает на приемник и возбуждает его. Полученный электрический сигнал поступает на вход широкополосного усилителя, после чего передается на компаратор, непосредственной задачей которого является преобразование пачки гармонических импульсов на выходе усилителя в одиночный импульс некоторого уровня, необходимый для согласования с микроконтроллером. Микроконтроллер обеспечивает и поддерживает работу синхрокольца: он генерирует на выходе одиночный импульс, усиливаемый усилителем и возбуждающий пьезоизлучатель. Пьезоизлучатель генерирует пачку затухающих ультразвуковых импульсов, которые проходят через исследуемую среду и через время  $t \approx 14$  мкс поступают на ультразвуковой приемник. Пачка электрических импульсов с выхода пьезоприемника усиливается и снова преобразуется в одиночный импульс нужного уровня, который поступает на вход микроконтроллера. По приходу этого импульса микроконтроллер генерирует новый импульс на выходе и весь процесс снова повторяется.

Информация о наличии в крови воздушных включений заложена в частоте одиночных импульсов, перемещающихся по синхрокольцу. Для измерения частоты импульсов в микроконтроллере организован частотомер, задачей которого является измерение частоты импульсов и преобразование этой частоты в соответствующее значение сигнала на выходе. На частоту импульсов существенное влияние оказывает скорость прохождения

---

ультразвука через исследуемую среду, они связаны следующей зависимостью:

$$c = \frac{L}{1/m - \Delta_t}, \quad (1)$$

где  $L$  – это база прозвучивания, т.е. расстояние между излучающим и приемным преобразователями;  $m$  – частота повторения импульсов;  $\Delta_t$  – паразитное время задержки, связанное с особенностями конструктивного выполнения акустических преобразователей и с прохождением импульса по электронной части схемы.

Время прохождения импульса по электрическим цепям прибора (усилители, генератор, кабель) часто не превышает 0,1-0,5 мкс (оно мало по сравнению со временем прохождения акустического импульса через исследуемую среду), поэтому иногда им пренебрегают, сводя, таким образом, формулу (1) к виду:

$$c = L \cdot m. \quad (2)$$

Если в пространстве между ультразвуковыми элементами находится только кровь, скорость прохождения ультразвуковых волн будет высокой, соответственно, высокой будет и частота импульсов в синхрокольце; если же в крови имеются воздушные включения, скорость распространения ультразвука снизится, вследствие чего понизится частота импульсов. При снижении скорости ультразвуковых волн, а, следовательно, и частоты импульсов, до некоторого критического уровня на выходе частометра устанавливается уровень логического «0», вследствие чего, происходит срабатывание светового индикатора, свидетельствующего о наличии в крови опасного уровня воздушных включений.

---

Таким образом, с помощью системы контроля воздушных включений, в основу которой положен разработанный ультразвуковой детектор воздуха, оказывается возможным обнаруживать мельчайшие воздушные скопления в крови, снижая тем самым риск возникновения воздушной эмболии и повышая безопасность проведения гемодиализной терапии.

### Литература:

1. Современное состояние и перспективы развития отечественной гемодиализной аппаратуры с регенерацией диализирующего раствора / В.А. Викторов [и др.] // Мед. техника: науч. - техн. журн. - 2003. - № 1 - с. 16-21.
2. Николаев А.Ю., Милованов Ю.С. Лечение почечной недостаточности: рук. для врачей. - М.: МИА, 1999. - 362 с.
3. Стецюк Е.А., Мазо Е.Б. Основы гемодиализа. – М.: Гэотар-Мед, 2001. – 392 с.
4. Гемодиализ и его осложнения [Электронный ресурс] // Гемодиализ для специалистов: онлайн журнал. – Онлайн журнал «Гемодиализ для специалистов», 2007. – Режим доступа: <http://www.hd13.ru>, свободный. – Загл. С экрана. (17.05.2014).
5. Гельфман М.И., Ковалевич О.В. Коллоидная химия: Учебник для вузов. - СПб.: Изд-во «Лань», 2003. - 336 с.
6. Клемина А.В., Демин И.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В. Медицинская акустика: ультразвуковая диагностика медико-биологических сред. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 103 с.
7. Леонова А.В., Чернов Н.Н., Кравчук Д.А. Методы и средства аналитических исследований биожидкостей: Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013 г. – 70 с.

### References:

1. Современное состояние и перспективы развития отечественной гемодиализной аппаратуры с регенерацией диализирующего раствора / V.A Viktorov [и др.] // Med. tehnika: nauch. - tehn. zhurn. - 2003. - № 1 - s. 16-21.
2. Nikolaev A.Ju., Milovanov Ju.S. Lechenie pochechnoj nedostatochnosti: ruk. dlja vrachej. - M.: MIA, 1999. - 362 s.
3. Stecjuk E.A., Mazo E.B. Osnovy gemodializa. – M.: Gjeotar-Med, 2001. – 392 s.
4. Gemodializ i ego oslozhenija [Elektronnyj resurs] // Gemodializ dlja specialistov: onlajn zhurnal. – Onlajn zhurnal «Gemodializ dlja specialistov», 2007. – Rezhim dostupa: <http://www.hd13.ru>, svobodnyj. – Zagl. S jekrana. (17.05.2014).
5. Gel'fman M.I., Kovalevich O.V. Kolloidnaja himija: Uchebnik dlja vuzov. - SPb.: Izd-vo «Lan'», 2003. - 336 s.
6. Klemina A.V., Demin I.Ju., Pronchatov-Rubcov N.V. Medicinskaja akustika: ul'trazvukovaja diagnostika mediko-biologicheskikh sred. Uchebno-metodicheskoe posobie. – Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosuniversitet, 2011. – 103 s.
7. Leonova A.V., Chernov N.N., Kravchuk D.A. Metody i sredstva analiticheskikh issledovanij biozhidkostej: Uchebno-metodicheskoe posobie k vypolneniju laboratornyh rabot. – Taganrog: Izd-vo JuFU, 2013 g. – 70 s.