

Новый класс псевдослучайных гексагональных конфигураций для кодирующих коллиматоров ионизирующих излучений

Аннотация

Рассмотрены новые способы построения двумерных гексагональных конфигураций на основе псевдослучайных и расширенных псевдослучайных последовательностей. Первый способ реализуется добавлением или исключением элементов традиционной гексагональной конфигурации. Получены также псевдопрямоугольные гексагональные конфигурации с гексагональными ячейками и их модификации. Все конфигурации сохраняют периодичность и возможность построения мозаики, что позволяет использовать их для создания многопинхольных кодирующих коллиматоров при регистрации ионизирующих излучений.

Использование интегрально-кодовых (мультиплексных) систем измерений (ИКСИ) позволяет повысить информативность исследований во многих направлениях научной деятельности. Такие системы нашли применение в рентгеновской и гамма-астрономии [1], [2], спектрометрии нейтронов по времени пролета [3]-[5], радиационной интроскопии [6]-[8], радиационной безопасности [9], [10] и в других областях [11]-[13].

В ИКСИ ионизирующих излучений могут быть использованы многопинхольные коллиматоры с различным расположением пинхолов: случайным, регулярным, минимально избыточным, геометрическим, псевдослучайным, модифицированным псевдослучайным и расширенным псевдослучайным, самоподдерживающимся, когерентным, троичным, расширенным троичным и др. [14]-[17].

Кроме многопинхольных коллиматоров в ИКСИ использовались и другие типы кодирующих коллиматоров (КК). Среди них к наиболее исследованным относятся КК в виде зонной пластины Френеля и ее различных модификаций [14], [18], [19].

Первоначально кодирующие устройства применяли для помехо- и шумоподавления [20]. Затем была поставлена и решена задача оптимизации среднего пропускания кодирующих коллиматоров в зависимости от квантовой статистики и вида распределения полезного сигнала и значения не кодируемого фона [14], [19].

Дальнейшие исследования ИКСИ во многом сопряжены с использованием кодирующих коллиматоров для томографической реконструкции трехмерных пространственных распределений радионуклидов без вращения массивной детектирующей системы вокруг объекта исследования [21].

Вся история развития ИКСИ связана с поиском оригинальных кодирующих устройств (см., например, [17], [22]-[24]), представляющих интерес как новые математические объекты с желательными свойствами, а также по практическим приложениям. Среди известных разработок можно выделить открытие расширенных псевдослучайных последовательностей (РПСП) [23], имеющих те же основные математические свойства, что и наиболее применяемые псевдослучайные последовательности (ПСП), но многократно превосходящие их как по количеству, так и по возможности построения большого числа двумерных КК разной размерности и с разным коэффициентом пропускания.

Среди кодирующих устройств наибольшее распространение получили двумерные многопинхольные кодирующие коллиматоры квадратной или прямоугольной формы на основе псевдослучайных таблиц (ПСТ), построенных, в свою очередь, на основе одномерных псевдослучайных последовательностей [25], [26].

ПСП наиболее просто определить как строки или столбцы (v, k, λ) матриц-циркулянтов, состоящих из нулей и единиц [27], [28]. Известные ПСП объединяют в семейства (типы), например по классификации М. Холла [29]. Существует компьютерная программа, генерирующая все известные ПСП с длиной $v \leq 10000$ [16]. Явный вид ПСП для не очень больших значений v приведен в [30], а также в [14], [17], [19]. ПСП для некоторых больших значений v приведены в явном виде в [16].

Анализ существующих ПСП показывает ограниченность набора значений $v = m \times n$, для которых можно построить двумерную ПСТ. Еще меньше выбор значений k , необходимых для оптимизации радиационно-физического эксперимента.

На основе одномерных последовательностей могут быть построены также двумерные псевдослучайные гексагональные конфигурации и соответствующие им гексагональные кодирующие коллиматоры (ГКК) [22], [31], [32].

Псевдослучайная гексагональная конфигурация (ПСГК) строится с помощью ПСП сворачиванием ее в гексагональную структуру. На длину ПСП v налагается при этом условие $v = 3R(R + 1) + 1$, где R – целое число, называемое рангом конфигурации. Так, допустимые длины ПСП для $v < 2000$ составляют: $v = 7$ ($R = 1$); 19 ($R = 2$); 127 ($R = 6$); 271 ($R = 9$); 331 ($R = 10$); 547 ($R = 13$); 631 ($R = 14$); 919 ($R = 17$); 1951 ($R = 25$).

Мозаичная структура ПСГК строится добавлением к базовому шестиугольнику со всех (шести) сторон половин таких же шестиугольников за исключением элементов, расположенных на их диагонали. Функционирование ГКК может быть описано теми же соотношениями, которые имеют место для ПСП и ПСТ. Гексагональные конфигурации могут быть также построены с использованием модифицированных ПСП [22].

Расширенные ПСП также позволяют построить на их основе расширенные ГКК. При одинаковых условиях, налагаемых на длины последовательностей и алгоритм построения гексагональных конфигураций, их число существенно возрастает. В результате появилась возможность большего выбора различных значений среднего пропускания рассматриваемых конфигураций.

Псевдогексагональные конфигурации

С целью дальнейшего увеличения количества возможных псевдослучайных двумерных кодирующих конфигураций посредством охвата не используемых ранее ПСП и РПСП предложен новый способ построения псевдогексагональных кодирующих конфигураций (ПГКК). Построение заключается в добавлении целого числа рядов ячеек к стандартной конфигурации или их исключение из нее. При этом необходимо, чтобы построение мозаичной конфигурации (мозаики) оставалось возможным, а добавление (исключение) дополнительных элементов сохраняло периодичность конфигурации (рис. 1).

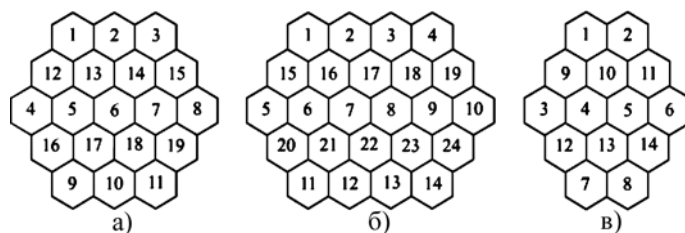


Рис. 1. Принцип построения ПГКК на примере ГКК ранга $R = 2$: а) исходная конфигурация ($Q = 0$); б) добавление дополнительных элементов ($Q = 1$); в) исключение дополнительных элементов ($Q = -1$)

Так, для конфигурации ранга R существует $(R - 1)$ отрицательных конфигураций (при исключении ряда ячеек) и бесконечное число положительных конфигураций (при добавлении ряда ячеек). При этом число элементов в ПГКК равно

$$v = 3R(R + 1) + 1 + Q(2R + 1),$$

где $Q = -R, -R + 1, \dots, 0, 1, \dots$ – коэффициент модификации. При $Q = 0$ ПГКК является стандартной ГКК (рис. 1а).

Гистограмма распределения количества возможных Q -конфигураций для ПСП показана на рис. 2а. Черным цветом выделены конфигурации при $Q = 0$.

Как отмечено ранее, расширенные ПСП имеют те же основные математические свойства, что и ПСП. Алгоритм построения РПСП заключается в добавлении к каждому элементу ПСП любого одинакового числа нулей ($b = 1, 2, \dots$) [23]. Таким образом, каждой исходной ПСП можно сопоставить бесконечное семейство расширенных последовательностей порядка b и длины $V = v(b + 1)$. Расширенные ПСП также могут быть использованы для построения РПКК.

Гистограмма распределения количества возможных Q -конфигураций для РПСП показана на рис. 2б. Черным цветом выделено количество стандартных конфигураций ($Q = 0$).

Отметим, что при нечетном Q и любом ранге требуются ПСП с четной длиной, которых очень мало. В то же время РПСП с четной длиной достаточно много. Результаты расчетов количества возможных РПКК приведены в табл. 1.

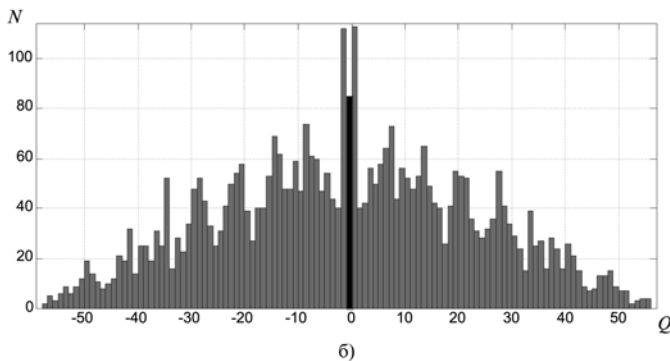
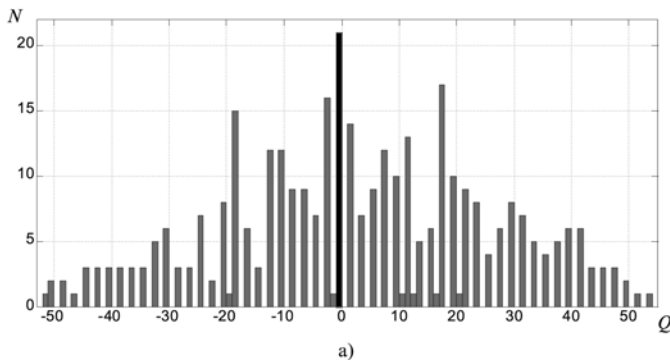


Рис. 2. Гистограммы распределения числа N возможных Q -конфигураций гексагонального типа от значения Q для ПСП (а) и для РПСП (б)

Таблица 1

Количество ПГКК для разных значений параметра Q

ПГКК	$Q = 0$	$ Q = 1$	$ Q = 2$	Все остальные значения Q
ПГКК на основе ПСП	21	1	20	306
ПГКК на основе РПСП	64	224	60	3209
Всего	85	225	80	3515

Можно также отметить, что если ранее для построения ГКК можно было использовать только 3 % существующих ПСП, то ПГКК позволяют охватить 33 % существующих ПСП.

Псевдопрямоугольные гексагональные конфигурации

По аналогии с прямоугольными конфигурациями с квадратными ячейками, а также с их модификациями можно постро-

ить псевдопрямоугольные конфигурации с гексагональными ячейками ППГК.

Таким образом, можно сформировать такое же количество ППГК, которое соответствует общему числу построчных прямоугольных КК. Однако сворачивание последовательности в базовую конфигурацию и построение мозаики более похоже на диагональный способ построения прямоугольных псевдослучайных таблиц. На рис. 3 показана базовая часть конфигурации и ее мозаика.

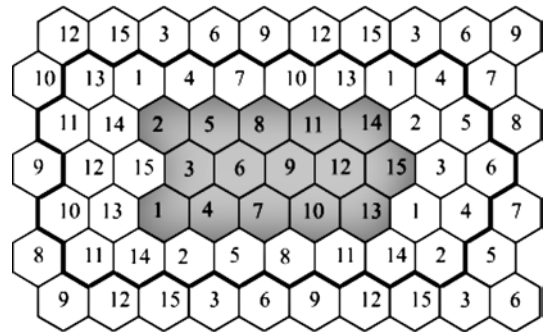


Рис. 3. Базовая часть (затемнена) и мозаика (рабочая часть мозаики отмечена внешней толстой линией) ППГК для $m \times n = 3 \times 5$

Число таких конфигураций, удовлетворяющих критерию

$$\min(m, n) \geq 11; |m - n| \leq 2; |Q| \leq 2, \quad (1)$$

равно 24 для ПСП и 920 для РПСП.

Модифицированные псевдопрямоугольные гексагональные конфигурации (МППГК)

С целью увеличения количества возможных псевдослучайных двумерных кодирующих конфигураций посредством охвата не используемых ранее ПСП можно предложить новый способ их построения построчным способом. Он основан на добавлении элементов к исходной ППГК или исключении из нее некоторых элементов. При этом необходимо, чтобы построение мозаичной конфигурации (мозаики) оставалось возможным, а добавление (исключение) элементов сохраняло периодичность конфигурации. Сворачивание последовательности в базовую часть и построение мозаичного МППГК соответствуют построчному способу построения псевдослучайной таблицы (рис. 4).

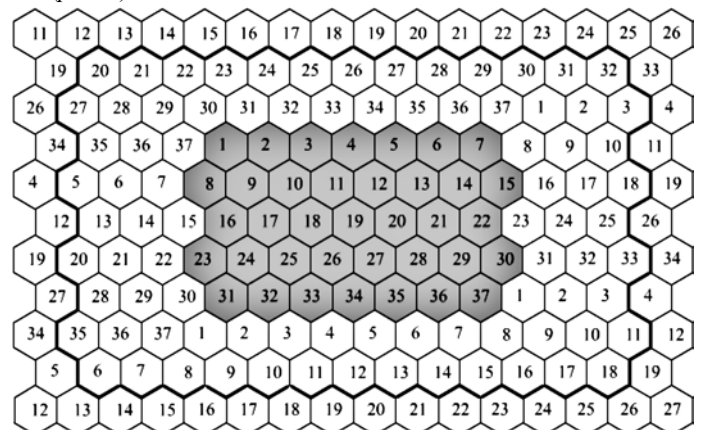


Рис. 4. Базовая часть (затемнена) и мозаика (рабочая часть мозаики отмечена внешней толстой линией) МППГК для $m \times n = 7 \times 5$

Модифицированные ППГК (МППГК) можно охарактеризовать параметром Q . При этом число элементов в МППГК равно

$$v = m \times n + (2Q + 1) \cdot \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor,$$

где $m \times n$ – размерность исходной конфигурации; [...] – операция взятия целой части.

Для конфигурации $m \times n$ параметр Q – целое число в интервале $(-m/2, \dots, +\infty)$. При этом, если $Q = -1/2$, МППГК становится исходной ППГК.

Количество всех возможных МППГК очень велико, поэтому целесообразно рассмотреть только конфигурации, удовлетворяющие критерию (1) и приведенные в табл. 2. Отметим, что МППГК позволяют охватить 56 % существующих ПСП.

Таблица 2

Количество МППГК для разных значений параметра Q

МППГК	$Q = -1/2$	$Q = 0$	$ Q = 1$	$ Q = 2$	Все остальные значения Q
МППГК на основе ПСП при условии (1)	24	19	29	24	745
МППГК на основе РПСР при условии (1)	920	733	1549	1456	30099
Всего для условия (1)	944	752	1578	1480	30844

Выводы

Предложены способы построения двумерных положительных и отрицательных псевдогексагональных конфигураций за счет добавления или исключения элементов традиционной псевдослучайной гексагональной конфигурации. Предложены способы построения двумерных псевдопрямоугольных гексагональных конфигураций с гексагональными ячейками и их модификаций на основе Q -конфигураций. Все предложенные кодирующие конфигурации могут быть построены на основе как псевдослучайных, так и расширенных псевдослучайных последовательностей. Определены ранее не используемые ПСП и РПСР, на основе которых могут быть построены такие кодирующие конфигурации. Так как полученные кодирующие конфигурации при существенном увеличении их числа сохраняют свойства традиционных двумерных псевдослучайных конфигураций, их можно использовать для создания кодирующих коллиматоров в интегрально-кодowych системах получения изображений радиоактивных объектов.

Список литературы:

1. Caroly J., Stephen J.B., Di Cocco G. et al. Coded aperture imaging in X-and Gamma-ray astronomy // Space Science Reviews. 1987. Vol. 45. № 3/4. PP. 349-403.
2. Jean in't Zand. Coded Aperture Imaging / http://astrophysics.gsfc.nasa.gov/cai/coded_inss.html. 2013.
3. Могильнер А.И., Сальников О.А., Тимохин Л.А. Корреляционный метод измерения энергетических спектров ядерных частиц по времени пролета // Приборы и техника эксперимента. 1966. № 2. С. 22.
4. Wilhelmi G., Gompf F. Binary sequences and error analysis for pseudo-statistical neutron modulators with different duty cycles // Nucl. Instr. Meth. 1970. Vol. 81. № 1. PP. 36-44.
5. Новопольцев М.И., Покотилковский Ю.П. Корреляционная времяпролетная спектрометрия ультрахолодных нейтронов // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 5. С. 19-27.
6. Accorsia R., Gasparinib F., Lanza R.C. Optimal coded aperture patterns for improved SNR in nuclear medicine imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2001. Vol. 474. PP. 273-284.
7. Немчинов В.М., Федоров Г.А., Самосадный А.В., Марков С.В., Семенов Д.С. Гамма-регистратор на основе кодированной

апертуры для эмиссионной томографии с уменьшенной дозой облучения пациента // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 5. С. 64-65.

8. Уткин В.М., Кумахов М.А., Блинов Н.Н. и др. Мобильная гамма-камера «МиниСкан» и результаты ее испытаний // Медицинская физика. 2007. № 1 (33). С. 42-53.
9. Durrant P.T., Dallimore M., Jupp I.D. et al. The application of pinhole and coded aperture imaging in the nuclear environment // Nucl. Instr. and Meth. A. 1999. Vol. 422. PP. 667-671.
10. Gmar M., Gal O., Le Goaller C. et al. Development of coded-aperture imaging with a compact gamma camera // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004. Vol. 51. № 4. PP. 1682-1687.
11. Сороко Л.М. Мультиплексные системы измерений в физике. – М.: Атомиздат, 1980.
12. Артемов А.С. Корреляционный метод невозмущающей диагностики пучков ионов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2001. Т. 32. Вып. 1. С. 189-211.
13. Gottesman S.R., Isser A., Gigioli G.W. Adaptive coded aperture imaging: Progress and potential future applications // Proc. Int. Soc. Optic. Eng. 2011. Vol. 8165. № 13. PP. 1-9.
14. Федоров Г.А. Радиационная интроскопия. Кодирование информации и оптимизация эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
15. Федоров Г.А., Терещенко С.А. Интегрально-кодowych системы регистрации ионизирующих излучений. 1. Коды и кодирующие устройства // Измерительная техника. 1995. № 11. С. 49-54.
16. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: Физматлит, 2004.
17. Федоров Г.А. Интегрально-кодowych системы измерений в радиационной физике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
18. Barrett H.H. Fresnel zone plate in nuclear medicine // J. Nuclear Medicine. 1972. Vol. 13. № 6. PP. 382-385.
19. Федоров Г.А., Терещенко С.А. Вычислительная эмиссионная томография. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. Dicke R.H. Scatter-Hole Cameras for X-Rays and Gamma Rays // The Astrophysical J. 1968. Vol. 153. PP. L101-L106.
21. Федоров Г.А., Терещенко С.А. Интегрально-кодowych системы регистрации ионизирующих излучений. Использование итерационных алгоритмов реконструкции изображений в методе фокусных плоскостей // Измерительная техника. 2001. № 4. С. 57-60.
22. Gottesman S.R., Fenimore E.E. New family of binary arrays for coded aperture imaging // Applied Optics. 1989. Vol. 28. № 20. PP. 4344-4352.
23. Федоров Г.А., Терещенко С.А. Расширенные псевдослучайные последовательности и двумерные кодирующие коллиматоры на их основе // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 66-71.
24. Byard K. Index class apertures – a class of flexible coded aperture // Applied Optics. 2012. Vol. 51. № 16. PP. 3453-3460.
25. Спани П. Свойство псевдослучайных последовательностей максимальной длины при двумерной корреляции // ТИИЭР. 1965. Т. 53. № 12. С. 2363-2364.
26. Макуильямс Ф.Дж., Слоан Н.Дж.А. Псевдослучайные последовательности и таблицы // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 12. С. 80-95.
27. Райзер Г.Дж. Комбинаторная математика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1966.
28. Маркус М., Минк Х. Обзор по теории матриц и матричных неравенств / Пер. с англ. – М.: Наука, 1972.
29. Холл М. Комбинаторика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1970.
30. Hossfeld F., Amadori R. On pseudorandom and Markov sequences optimizing correlation time-of-flight spectrometry // Berichte der Kernforschungsanlage. Jul-684-FF (KFA, Julich), 1970.
31. Cook W.R., Finger M., Prince T.A., Stone E.C. Gamma-ray imaging with a rotating hexagonal uniformly redundant array // IEEE Tr. on Nuclear Science. 1984. Vol. NS-31. № 1. PP. 771-775.

Н.А. Базаев, Б.М. Путря, Е.В. Стрельцов

Носимая аппаратура для искусственного очищения крови

Аннотация

За последние несколько лет было предпринято несколько попыток миниатюризации аппаратуры искусственного очищения крови – создания носимого аппарата «искусственная почка». Техническая реализация носимой аппаратуры «искусственная почка» возможна на базе гемодиализа и перитонеального диализа. В статье описаны существующие на сегодняшний день зарубежные прототипы носимых аппаратов искусственного очищения крови, а также их основные преимущества и недостатки.

Повышение технологичности медицины является одним из главных трендов развития здравоохранения и повышения уровня жизни пациентов. В условиях быстрого развития медицинской техники повышаются требования к качеству медицинских процедур и эффективности их воздействия на организм пациента. В последние несколько лет в области аппаратуры искусственного очищения крови было предпринято несколько попыток ее миниатюризации – создания носимого аппарата «искусственная почка». Подобное изменение аппаратуры обусловлено несколькими факторами: 1) повышением физиологичности процедуры; 2) уменьшением стоимости аппарата и процедуры диализа; 3) повышением комфортности и адекватности диализа. В данной статье представлен обзор прототипов носимой аппаратуры «искусственная почка», существующих в мире в настоящее время.

Техническая реализация носимой аппаратуры «искусственная почка» возможна на базе гемодиализа (рис. 1а) и перитонеального диализа (рис. 1б, в). В первом случае (аппараты WAK, WAKD, iRAD) очищение крови пациента осуществляется в экстракорпоральном контуре. Кровь пациента транспортируется через диализатор, где происходит массоперенос метаболитов из крови в диализирующий раствор, и возвращается в организм пациента. После выхода из массообменного устройства диализат поступает в блок регенерации диализата (БРД), где диализирующий раствор регенерирует до исходного химического состава.

В случае перитонеального диализа (AWAK, «Ренарт-01-Н») метаболиты из крови переходят в перитонеальный раствор через перитонеальную мембрану пациента, таким образом, нет необходимости в заборе и возврате крови пациента из орга-

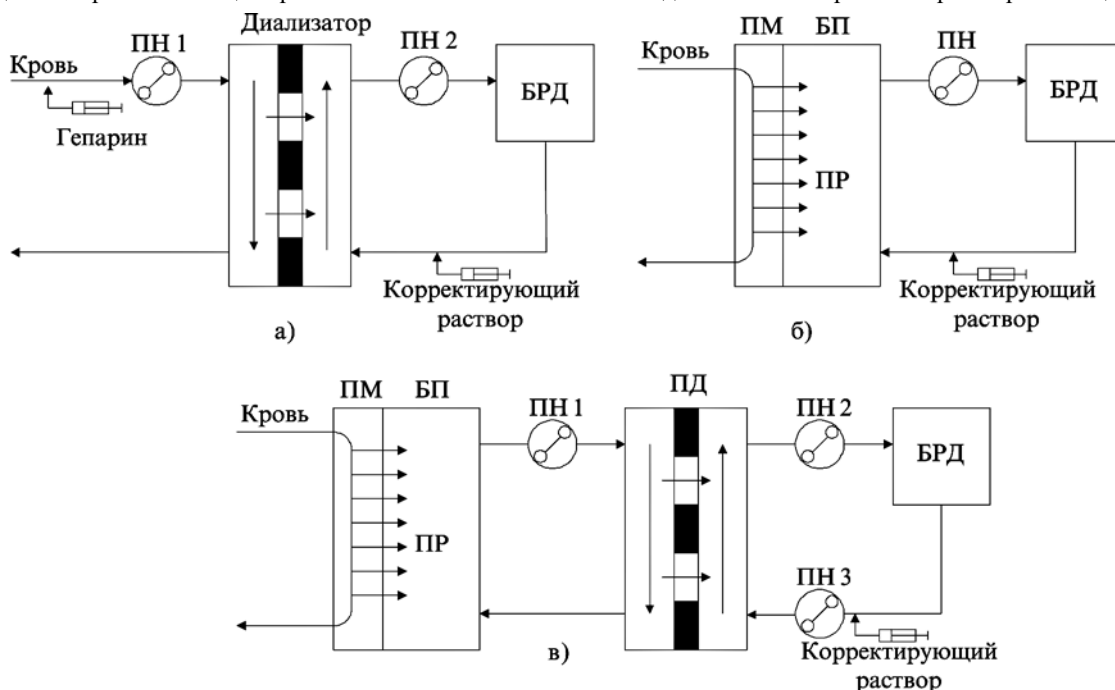


Рис. 1. Схемы носимой аппаратуры внепочечного очищения крови на основе гемодиализа (а) и перитонеального диализа (б, в): БРД – блок регенерации диализата; ПН – перистальтический насос; ПМ – перитонеальная мембрана; ПР – перитонеальный раствор; БП – брюшная полость