



Байко С.В.¹ ✉, Музуров А.Л.^{2,3}, Шепетов А.М.⁴, Шавкин А.Л.⁵, Румянцев А.Л.⁶,
Кулакова Е.Н.⁷, Ганиев Б.К.⁸

¹ Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

³ Детская городская клиническая больница святого Владимира, Москва, Россия

⁴ Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан

⁵ Детский городской многопрофильный клинический специализированный центр высоких медицинских технологий, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Детская городская клиническая больница имени Н.Ф. Филатова, Москва, Россия

⁷ Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко, Воронеж, Россия

⁸ Самаркандский областной многопрофильный детский медицинский центр, Самарканд, Узбекистан

Острое повреждение почек у детей: заместительная почечная терапия (обзор литературы). Часть 3*

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Байко С.В. – обработка литературных источников, написание и окончательное редактирование; Музуров А.Л., Шепетов А.М., Шавкин А.Л., Румянцев А.Л., Кулакова Е.Н., Ганиев Б.К. – концепция и окончательное редактирование.

Для цитирования: Байко С.В., Музуров А.Л., Шепетов А.М., Шавкин А.Л., Румянцев А.Л., Кулакова Е.Н., Ганиев Б.К. Острое повреждение почек у детей: заместительная почечная терапия (обзор литературы). Часть 3. *Педиатрия Восточная Европа*. 2025;13(4):508–537. <https://doi.org/10.34883/PI.2025.13.4.001>

Подана: 06.07.2025

Принята: 17.10.2025

Контакты: baiko@yandex.ru

Резюме

Острое повреждение почек (ОПП) относится к состояниям, при которых нередко для спасения жизни ребенка приходится прибегать к методам заместительной почечной терапии (ЗПТ): интермиттирующему гемодиализу (иГД), перитонеальному диализу (ПД), непрерывным методам ЗПТ (непрерывной вено-венозной гемо(диа)фльтрации (НВВГ(Д)Ф и др.).

Цель обзора – обобщить имеющуюся информацию о показаниях и выборе метода ЗПТ, основных принципах, особенностях, преимуществах и недостатках иГД, ПД,

* Предыдущие части статьи можно найти по ссылкам:

<https://doi.org/10.34883/PI.2024.12.3.001> (часть 1)

<https://doi.org/10.34883/PI.2025.13.2.001> (часть 2)

НВВГ(Д)Ф и представить протоколы начальной и последующей диализной терапии у детей с ОПП.

Различные достижения в использовании текущих методов ЗПТ, разработка новых диализных аппаратов, в том числе для детей раннего возраста, и совершенствование мер по профилактике сердечно-легочных осложнений привели к улучшению исходов ОПП. Оптимизация ПД включает использование биосовместимых растворов (рН нейтральных, с бикарбонатным буфером) и улучшение управления ультрафильтрацией (автоматический и ПД с непрерывным потоком). Внедрение высокопоточной НВВГ(Д)Ф улучшило выведение ряда токсичных метаболитов, что привело к повышению выживаемости пациентов. Выявление достоверной связи между степенью гипергидратации и риском летальности у детей с ОПП позволило обосновать более раннее начало ЗПТ.

В статье представлены протоколы назначения всех доступных методов ЗПТ, что существенно облегчит практическим врачам подготовку начальной и последующей программ диализной терапии.

Методы ЗПТ являются неотъемлемой частью лечения многих детей с ОПП, а постоянное их совершенствование позволяет надеяться на дальнейшее улучшение исходов.

Ключевые слова: острое повреждение почек (ОПП), дети, заместительная почечная терапия (ЗПТ), гемодиализ, перитонеальный диализ, непрерывная вено-венозная гемо(диа)фильтрация

Sergey V. Baiko¹ ✉, Alexander L. Muzurov^{2,3}, Abay M. Shepetov⁴, Alexey L. Shavkin⁵, Alexander L. Rumyantsev⁶, Elena N. Kulakova⁷, Bakhodir K. Ganiev⁸

¹ Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

³ Children's City Clinical Hospital of St. Vladimir, Moscow, Russia

⁴ Kazakh National Medical University named after S.D. Asfendiyarov, Almaty, Kazakhstan

⁵ Children's Urban Multidisciplinary Clinical Specialized Center of High Medical Technologies, Saint Petersburg, Russia

⁶ N.F. Filatov Moscow City Children's Clinical Hospital, Moscow, Russia

⁷ N.N. Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, Russia

⁸ Samarkand Regional Multidisciplinary Children's Medical Center, Samarkand, Uzbekistan

Acute Kidney Injury in Children: Kidney Replacement Therapy (A Literature Review). Part 3*

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Sergey V. Baiko – literature review, text writing and final editing, Alexander L. Muzurov, Abay M. Shepetov, Alexey L. Shavkin, Alexander L. Rumyantsev, Elena N. Kulakova, Bakhodir K. Ganiev – concept and final editing.

For citation: Baiko S., Muzurov A., Shepetov A., Shavkin A., Rumyantsev A., Kulakova E., Ganiev B. Acute Kidney Injury in Children: Kidney Replacement Therapy (A Literature Review). Part 3. *Pediatrics Eastern Europe*. 2025;13(4):508–537. (In Russ.). <https://doi.org/10.34883/PI.2025.13.4.001>

Submitted: 06.07.2025

Accepted: 17.10.2025

Contacts: baiko@yandex.ru

Abstract

Acute kidney injury (AKI) is a condition in which kidney replacement therapy (KRT) methods such as intermittent hemodialysis (IHD), peritoneal dialysis (PD), and continuous KRT methods (continuous veno-venous hemo(dia)filtration (CVVH(D), etc.) are often used to save a child's life.

The aim of this review is to summarize the available information on indications and choice of KRT method, the main principles, features, advantages and disadvantages of IHD, PD, CVVH(D), and to present protocols for initial and subsequent dialysis therapy in AKI children.

Various advances in the use of current KRT methods, newly designed dialysis machines for infants, and measures for preventing cardiopulmonary complications have led to improved AKI outcomes. Changes in PD include the use of biocompatible solutions (pH neutral, and with bicarbonate buffer) and improved ultrafiltration management (automatic and continuous flow PD). The introduction of high-flow CVVH(D) improved toxic metabolites elimination, resulting in increased patients' survival. The identification of a significant association between the degree of hyperhydration and the risk of mortality in AKI children allowed justifying an earlier KRT initiation.

* Previous parts of the article can be found at the following links:

<https://doi.org/10.34883/PI.2024.12.3.001> (part 1)

<https://doi.org/10.34883/PI.2025.13.2.001> (part 2)

The article presents protocols for prescribing all available KRT methods, which will significantly facilitate preparing initial and follow-up dialysis therapy programs for practicing physicians.

KRT methods are an integral part of the treatment of many AKI children, and their continuous enhancement gives hope for further improvement in outcomes.

Keywords: acute kidney injury (AKI), children, kidney replacement therapy (KRT), hemodialysis, peritoneal dialysis, continuous veno-venous hemo(dia)filtration (CVVH(D))

■ ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается изменение эпидемиологии острого повреждения почек (ОПП) у детей: первичные заболевания почек, в основном наблюдавшиеся в конце XX века, сменились повреждениями, обусловленными системными заболеваниями и/или проводимым лечением (например, сепсисом и применением нефротоксичных препаратов) [1–3]. ОПП определяется как синдром внезапного снижения скорости клубочковой фильтрации (СКФ) различной этиологии, который сопровождается задержкой в крови продуктов азотистого обмена, нарушениями водно-электролитного, кислотно-щелочного равновесия и других гомеостатических функций [2, 3]. Тяжелое ОПП диагностируется при повышении уровня креатинина сыворотки в 2 и более раза выше исходного в течение 7 дней и/или снижении диуреза менее 0,5 мл/кг/ч в течение 12 часов и более, что соответствует 2–3-й стадиям ОПП по классификации KDIGO 2012 (Kidney Disease Improving Global Outcome) [2–4].

Лечение детей с ОПП остается преимущественно поддерживающим, однако пациентам с тяжелым ОПП часто требуется назначение заместительной почечной терапии (ЗПТ, диализа) [2, 4, 5]. ЗПТ – это лечение, которое заменяет функцию фильтрации крови почками. У детей с ОПП используются следующие методы ЗПТ:

- интермиттирующий гемодиализ (иГД);
- продленный интермиттирующий гемодиализ (ПИГД);
- перитонеальный диализ (ПД);
- непрерывная ЗПТ (НЗПТ):
 - непрерывный вено-венозный гемодиализ (НВВГД);
 - непрерывная вено-венозная гемофильтрация (НВВГФ);
 - непрерывная вено-венозная гемодифльтрация (НВВГДФ).

Продолжительность прерывистых (интермиттирующих) методов ЗПТ составляет 2–6 часов, продленных интермиттирующих – 6–18 часов, а непрерывных – не менее 24 часов.

По результатам многочисленных исследований было доказано, что перегрузка жидкостью (гипергидратация) у детей с ОПП тесно связана с тяжестью заболевания, смертностью и неблагоприятными исходами [2, 4, 6–11]. Наиболее высокая летальность отмечается у детей первого года жизни, у пациентов с полиорганной недостаточностью и значительной перегрузкой жидкостью [2, 4, 6–11]. В недавнем систематическом обзоре и метаанализе установлено, что на каждый 1% увеличения массы тела у детей с ОПП риск летального исхода повышается на 6% [11]. ЗПТ предотвращает и устраняет неблагоприятные и потенциально опасные для жизни осложнения ОПП, включая симптоматическую уремию, метаболический и электролитный

дисбаланс, тяжелую гипергидратацию. Раннее начало и эффективное применение ЗПТ при ОПП улучшает выживаемость у детей в критическом состоянии [12, 13]. Тем не менее по-прежнему отсутствуют надежные научно обоснованные рекомендации относительно показаний и сроков начала ЗПТ у детей, а также наиболее подходящего метода ЗПТ для использования в педиатрии в различных условиях.

Цель данного обзора – обобщить имеющуюся информацию о показаниях, сроках и выборе метода ЗПТ, основных принципах, особенностях, преимуществах и недостатках ИГД, ПД, НПЗТ и представить протоколы начальной и последующей диализной терапии у детей с ОПП.

■ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКОВ И ПОКАЗАНИЙ К ЗАМЕСТИТЕЛЬНОЙ ПОЧЕЧНОЙ ТЕРАПИИ

Начинать ли ЗПТ и если да, то когда – два основных вопроса, которые возникают у нефрологов и врачей педиатрических отделений интенсивной терапии (пОИТ) при лечении пациентов с тяжелым ОПП. Оптимальное время начала диализа при ОПП не установлено. Наиболее часто решение о начале ЗПТ принимается при наличии клинически значимых проявлений гипергидратации и/или лабораторных изменений (азотемия, гиперкалиемия, тяжелый метаболический ацидоз). Клиницисты стараются отсрочить начало ЗПТ, если предполагают, что пациент может восстановить функцию почек самостоятельно (например, при остром тубулоинтерстициальном нефрите), а также если опасаются возникновения осложнений, связанных с процедурой ЗПТ (гипотензия, аритмии и др.) или сосудистым доступом и антикоагулянтной терапией [2, 14].

Согласно рекомендациям рабочей группы экспертов KDIGO [2, 14]:

- ЗПТ должна быть начата немедленно, как только выявляются опасные для жизни нарушения водного и электролитного, а также кислотно-щелочного равновесия;
- решение о начале ЗПТ должно приниматься не только на основании показателей мочевины и креатинина крови, но в большей мере на оценке динамики лабораторных данных и на основании всестороннего анализа клинической ситуации в целом.

Таким образом, решение о начале ЗПТ принимается с учетом тяжести и осложнений ОПП, а также срочности их разрешения.

Экстренными показаниями к ЗПТ при ОПП являются следующие [4]:

1. Клинически значимая перегрузка жидкостью с признаками отека легких и/или застойной сердечной недостаточности, не отвечающая на введение фуросемида и ограничение жидкости (обычно наблюдается у пациентов с гипергидратацией >15%).
2. Наличие уремических осложнений, таких как перикардит, кровотечение, уремическая энцефалопатия или необъяснимое изменение психического состояния.
3. Опасные для жизни метаболические нарушения, не поддающиеся медикаментозному лечению:
 - персистирующая гиперкалиемия (>6,5 ммоль/л с ЭКГ-признаками);
 - метаболический ацидоз (рН <7,1, ВЕ <-10);
 - стойкая гипонатриемия (<120 ммоль/л);
 - другие метаболические нарушения, включая синдром лизиса опухоли и гиперраммониемию.

4. Необходимость удаления токсинов или лекарственных средств, которые выводятся с помощью диализа, включая спирты, литий, салицилаты и другие препараты.

Ранее отмечалось, что уровни мочевины и креатинина крови не являются определяющими критериями для начала ЗПТ [2, 14], однако в некоторых диализных центрах они установлены и используются в клинической практике [4]. Так, в одном из центров [4] показанием к ЗПТ считается повышение мочевины крови более 35,7 ммоль/л у пациентов с олигурией без ответа на диуретики, с ухудшением в динамике электролитного баланса и возрастающей потребностью в питании. Единственные национальные рекомендации (Великобритания) включают в качестве показаний для диализа уровень мочевины крови более 40 ммоль/л (более 30 ммоль/л у новорожденных) [15]. Однако результаты исследований у взрослых пациентов показывают, что раннее начало ЗПТ на основании уровня мочевины не совсем обосновано, поскольку ее использование в качестве индикатора для ЗПТ ограничено некоторыми внепочечными факторами, такими как состояние гидратации, эпизоды желудочно-кишечного кровотечения, использование стероидов, диуретиков, катаболизм и нутритивный статус [4]. Уровень креатинина крови сам по себе не является показанием к ЗПТ, так как его повышение происходит на поздних стадиях ОПП и, следовательно, не может использоваться в качестве раннего маркера, определяющего время начала ЗПТ. На его уровень также влияют статус гидратации, мышечная масса, которая варьирует в зависимости от возраста и пола ребенка, состояние питания и сопутствующие заболевания [16].

Для некоторых пациентов с тяжелым ОПП, но без одного из вышеперечисленных состояний диализ может быть оправдан для предотвращения развития осложнений и/или ухудшения клинического состояния пациента. В этих случаях решение о начале ЗПТ основывается в первую очередь на клиническом мышлении и опыте врачей и требует учета динамики изменений клинических и лабораторных данных, характеристик пациента (возраст, острота патологического процесса, сопутствующие заболевания, текущие потребности) и ресурсного обеспечения, включая наличие необходимого оборудования и обученного, опытного персонала.

Плановые показания к ЗПТ включают [4]:

1. Высокий риск клинически значимой перегрузки жидкостью:
 - снижение диуреза (олигурия более 24 часов, анурия более 12 часов), не поддающееся лечению диуретиками, с необходимостью введения большого объема питательных веществ, лекарственных препаратов и/или препаратов крови на фоне продолжающегося ухудшения функции почек;
 - нарастающая гипергидратация с появлением тахикардии, артериальной гипертензии и возрастающим риском перевода на ИВЛ.
2. Рефрактерные электролитные и кислотно-щелочные нарушения, не поддающиеся консервативному лечению (например, рефрактерная тяжелая гиперкалиемия, но еще не достигающая значений, представляющих угрозу для жизни (см. выше)).

В клинических рекомендациях Американского общества интенсивной терапии по гемодинамической поддержке новорожденных и детей с септическим шоком предлагается рассмотреть возможность применения ЗПТ в случае высоких рисков значительной перегрузки жидкостью. После достижения гемодинамической стабильности диуретики или ЗПТ рекомендуется использовать для удаления жидкости у пациентов с гипергидратацией более 10% и не способных поддерживать баланс

жидкости с помощью собственного диуреза и/или внепочечных потерь [17]. ЗПТ также часто используется для поддержания гидробаланса у детей в критическом состоянии, у которых наблюдается олигурия, но которым требуются большие объемы внутривенных жидкостей, включая парентеральное питание, лекарства и/или препараты крови. В этом случае ЗПТ используется не для удаления жидкости, а для предотвращения дальнейшей перегрузки жидкостью, которая может привести к ухудшению респираторного статуса и сердечной функции [4]. Дети раннего возраста с врожденными нарушениями метаболизма, у которых диета и медикаментозная терапия неэффективны, нуждаются в быстром удалении аммиака для уменьшения риска смерти и развития стойких неврологических нарушений. Пациенты, оперированные по поводу врожденных пороков сердца с применением искусственного кровообращения, в раннем послеоперационном периоде часто требуют проведения ПД для предупреждения развития гипергидратации и метаболических нарушений [14].

Хотя многочисленные исследования у взрослых не позволяют сделать окончательные выводы о преимуществах ранней ЗПТ [18], большинство специалистов в педиатрической практике склоняются к раннему началу ЗПТ у пациентов с тяжелым ОПП и отсутствием предпосылок к его разрешению (например, при гемолитико-уремическом синдроме, длительной олигоанурии и т. д.) [4].

■ ВЫБОР МЕТОДА ЗАМЕСТИТЕЛЬНОЙ ПОЧЕЧНОЙ ТЕРАПИИ У ДЕТЕЙ С ОПП

Представления об оптимальном методе ЗПТ у детей с ОПП неоднозначны, а выбор часто зависит от имеющихся ресурсов, опыта центра и характеристик пациента. Для выбора наиболее подходящего метода ЗПТ у ребенка с ОПП необходимо оценить следующие факторы.

Антропометрические параметры пациента

Антропометрические параметры – важный фактор при выборе метода диализа, поскольку иГД и НПЗТ могут быть невозможны у детей с массой тела <15 кг. Большинство аппаратов НПЗТ и гемодиализа, используемых в мире, одобрены только для пациентов с массой >15–20 кг. Однако в некоторых ситуациях это оборудование используется off-label у маленьких пациентов с массой <10–12 кг, при этом объем заполнения экстракорпоральных контуров магистралей превышает 10% объема циркулирующей крови (ОЦК) ребенка. В этих случаях используется предварительное заполнение экстракорпорального контура эритроцитарной массой или 5%-ным раствором альбумина, чтобы предотвратить гемодинамическую нестабильность [19, 20]. В мире доступны аппараты, диализаторы и системы магистралей для очень маленьких детей, но из-за своей дороговизны они пока не получили широкого распространения [21–23]. С разработкой новых систем диализа частота использования острого ПД снижается в высокоразвитых странах. Тем не менее ПД остается наиболее распространенным в мире методом лечения детей раннего возраста, которым требуется ЗПТ.

Диализный доступ

Гемодиализ и НПЗТ требуют установки 2-просветного центрального венозного катетера большого диаметра, что часто является технически сложным для детей раннего возраста или пациентов с сосудистыми аномалиями. Для детей, находящихся

на экстракорпоральной мембранной оксигенации (ЭКМО), доступ для НПЗТ может быть обеспечен через контур ЭКМО.

Для проведения ПД необходима имплантация в брюшную полость специального ПД-катетера. ПД может эффективно применяться у детей любого возраста. К наиболее частым осложнениям острого ПД относятся обструкция ПД-катетера (сальником, сгустками крови, фибрином), протечка диализата и инфекции. Данный метод ЗПТ противопоказан пациентам с диафрагмальной грыжей, омфалоцеле, гастрошизисом, экстрофией мочевого пузыря, некротизирующим энтероколитом и др.

Гемодинамическая нестабильность

Использование иГД при гемодинамической нестабильности может ухудшить состояние пациента, поскольку удаление большого объема жидкости в течение короткого промежутка времени (4–6 часов) представляет серьезную нагрузку для гемодинамики. В этом случае НПЗТ или ПД обеспечивают более постепенное и устойчивое удаление растворенных веществ и жидкости, не вызывая существенных перепадов в ОЦК.

Тяжесть заболевания

Тяжесть заболевания пациента может также определять выбор метода ЗПТ. Нахождение ребенка в пОИТ часто делает невозможным проведение иГД, и выбор между НПЗТ и ПД будет определяться на основании доступности метода, массы тела ребенка и стабильности гемодинамики.

Ожидаемая продолжительность ЗПТ

Важно учитывать вероятную продолжительность ЗПТ. Например, у ребенка с гемолитико-уремическим синдромом и длительной олигоанурией (более 24 часов), выраженной перегрузкой жидкостью и/или уреемией начинают лечение с НПЗТ в течение 1–3 дней до стабилизации состояния. Поскольку предполагается, что диализ в этой ситуации потребует в течение 8–20 дней, то в дальнейшем пациента переводят на иГД или ПД в зависимости от доступности метода ЗПТ и массы тела ребенка.

Преимущества и недостатки методов ЗПТ представлены в табл. 1 [2, 14, 23], а сравнение основных характеристик методов ЗПТ в табл. 2 [1, 20].

Таблица 1
Преимущества и недостатки методов заместительной почечной терапии [2, 14, 23]
Table 1

Advantages and disadvantages of kidney replacement therapy methods [2, 14, 23]

Метод ЗПТ	Физические принципы	Min время сеанса, часы	Преимущества	Недостатки
ПД	Диффузия, конвекция	24	Не сложен технически; низкая стоимость; не требуется антикоагуляция; не требуется сосудистый доступ; может проводиться гемодинамически нестабильным пациентам	Медленное удаление низкомолекулярных веществ и токсинов; плохо предсказуемый объем удаления жидкости; потеря белка с диализатом; риск инфекций (например, перитонита); риск гипергликемии; невозможность проведения после недавних операций на брюшной полости; возможно нарушение дыхания из-за повышения внутрибрюшного давления

Окончание таблицы 1

иГД	Диффузия	4–6	Быстрое удаление токсинов, электролитов, жидкости; минимальная антикоагуляция / ее отсутствие; больше времени для мобильности пациента; дешевле, чем НПЗТ	Требуется сосудистый доступ; развитие гипотензии при быстром удалении жидкости; развитие дизэквилибриум-синдрома с риском отека мозга при быстром удалении токсинов и электролитов; сложен и трудоемок технически, требует сложной аппаратуры, водоподготовки; не рекомендуется критическим пациентам с нестабильной гемодинамикой; возврат к нарастанию уровня токсинов после прекращения
НВВГФ	Конвекция	24	Конвекция обеспечивает высокоэффективное удаление средних молекул и цитокинов; непрерывное удаление уремических токсинов и жидкости; может использоваться у гемодинамически нестабильных пациентов; не вызывает повышения внутричерепного давления	Требуется сосудистый доступ и длительная антикоагуляция; медленный клиренс уремических токсинов, менее эффективен для удаления малых молекул, чем иГД; сложен и трудоемок технически, требует сложной аппаратуры, подготовленного персонала; иммобилизация пациента; гипотермия; высокая стоимость
НВВГД	Диффузия	24	См. НВВГФ, за исключением: конвекция обеспечивает высокоэффективное удаление средних молекул и цитокинов; + более эффективен в удалении малых молекул, чем НВВГФ	
НВВГДФ	Диффузия/конвекция	24	См. НВВГФ + более эффективен в удалении малых молекул, чем НВВГФ	

Примечания: ПД – перитонеальный диализ, иГД – интермиттирующий гемодиализ, НВВГФ – непрерывная вено-венозная гемофильтрация, НВВГД – непрерывный вено-венозный гемодиализ, НВВГДФ – непрерывная вено-венозная гемодиализация.

Таблица 2
Сравнение основных характеристик методов заместительной почечной терапии [1, 20]
Table 2
Comparison of the main characteristics of kidney replacement therapy methods [1, 20]

Характеристики	ПД	иГД	НПЗТ
Продолжительность (часы)	24	4–6	24
Частота	Круглосуточно (сутки – недели)	Ежедневно / через день	Круглосуточно (сутки – недели)
Наиболее частые показания	ОПП у новорожденных и детей раннего возраста, после кардиохирургических операций	Тяжелая гиперкалиемия, отек легких, гипераммониемия	Полиорганная недостаточность, сепсис, гипераммониемия
Технические трудности	+	++	+++
Доступ	Перитонеальный катетер (ПД-катетер)	Центральный венозный диализный катетер	

Окончание таблицы 2

Инфекционные осложнения	Инфекция места выхода и/или туннеля, перитонит	Катетерная инфекция	
Механические осложнения	Обструкция, дислокация, подтекание	Тромбоз, стеноз вены	
Доступность	+++	++	+
Контроль удаления жидкости	±	++	+++
Влияние на гемодинамику	+	+++	+
Необходимость антикоагуляции	–	±	+
Суточное удаление токсинов	+	+++	+++
Скорость удаления токсинов	+	+++	++
Калорическая поддержка за счет диализного раствора	+	–	–
Возможность использования у новорожденных	+++	–	+

Примечания: ПД – перитонеальный диализ; иГД – интермиттирующий гемодиализ; НПЗТ – непрерывная заместительная почечная терапия.

■ ПЕРИТОНЕАЛЬНЫЙ ДИАЛИЗ

Исторически сложилось так, что ПД был основным методом ЗПТ, применяемым в педиатрии для лечения ОПП [1, 24]. В последние десятилетия использование ПД при ОПП сократилось в пользу других методов экстракорпоральной детоксикации: НПЗТ и иГД [25, 26]. Не получено доказательств различий в эффективности и неблагоприятных исходах между методами экстракорпорального (иГД, НПЗТ) и интракорпорального (ПД) диализа в лечении детей с ОПП [27]. Доля использования ПД при ОПП среди европейских детских диализных центров в 2019 году составила 39,4%, он являлся лидирующим методом ЗПТ [26].

Общие характеристики метода

Для осуществления острого ПД в брюшную полость имплантируется перитонеальный катетер, к которому присоединяется Y-образная система магистралей, по одной из которых заливается специальный диализный (диализирующий) раствор, а по другой после определенного времени экспозиции (0,5–4 часа) в брюшной полости сливается «зашлакованный» диализат (рис. 1А). Этот процесс повторяется многократно в круглосуточном режиме на протяжении суток – недель до восстановления функции собственных почек. Принцип всех методов ЗПТ (ПД, иГД, НПЗТ) заключается в очищении крови от продуктов азотистого обмена и других токсических веществ, удалении жидкости из организма, нормализации электролитного и кислотно-щелочного баланса. Процесс этот осуществляется через полупроницаемую мембрану, которой в случае ПД выступает брюшина. После поступления диализирующего раствора в брюшную полость в него из крови через перитонеальную мембрану устремляются токсические вещества, ряд электролитов (калий, фосфор, магний), белки, вода, а в обратном направлении движутся бикарбонат, необходимый для нормализации рН крови, некоторые электролиты (кальций, натрий) и глюкоза. Основными физическими процессами выступают диффузия (движение преимущественно низкомолекулярных веществ по градиенту концентрации) и конвекция (процесс переноса растворенных веществ вместе с жидкостью, позволяющий удалять также средние и

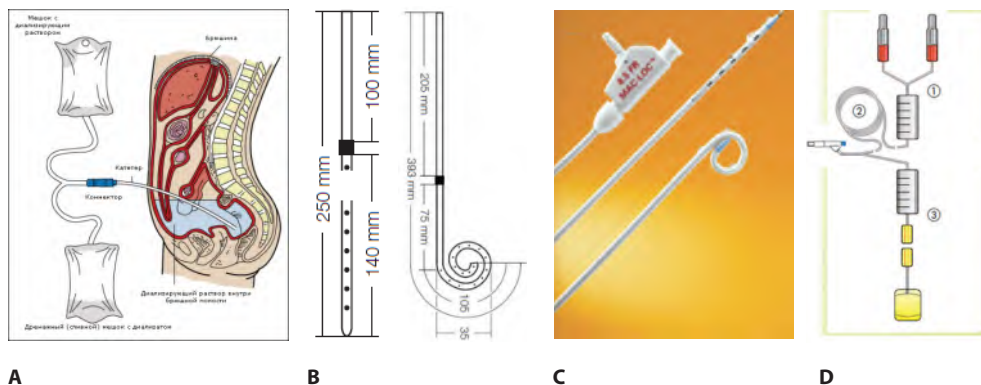


Рис. 1. Перитонеальный диализ: А – принцип метода (<http://pochka.org/13-category-6>); В – катетер Тенкхоффа с одной манжеткой прямой (слева) и с завитком (справа) [31]; С – многоцелевой дренажный катетер Cook Mac-Loc: вверху механизм коннекции Mac-Loc, в центре дистальные фенестрации прямого катетера, внизу дистальный завиток катетера [32]; D – ПД-система для маленьких детей с бюретками для точного контроля объема заливаемого (1) и сливаемого (3) раствора
Fig. 1. Peritoneal dialysis: A – Principle of the method (<http://pochka.org/13-category-6>); B – Tenckhoff-Catheter with one cuff straight (left) and with a curl (right) [31]; C – Cook Mac Loc Multipurpose Drainage catheter: (Top) Mac-Loc mechanism, (center) distal fenestrations, (bottom) distal catheter coiling [32]; D – PD-system for young children with burettes for accurate control of the fill (1) and out (3) volume of the solution

крупные молекулы). Адекватность ПД обеспечивается определенным объемом и частотой смены раствора в течение суток и оценивается по концентрации креатинина и мочевины, электролитов, бикарбоната крови, объему удаляемой жидкости из организма ребенка (объему ультрафильтрации (УФ)), наличию отеков, уровню артериального давления и общему состоянию пациента.

Доступ, выбор ПД-катетера и систем доставки ПД-растворов

Эксперты Международного общества по перитонеальному диализу (ISPD, International Society for Peritoneal Dialysis) в 2020 году разработали руководство по ПД при ОПП у детей, которое включает следующие положения [28]:

1. В качестве оптимального выбора доступа для ПД рекомендуется ПД-катетер Тенкхоффа, имплантируемый хирургом в операционной. Лапароскопическая и лапаротомическая установка катетеров Тенкхоффа у детей одинаково успешна и не различается по частоте осложнений [29]. Гибкий катетер Тенкхоффа с одной манжетой, прямой или с завитком (рис. 1В) является предпочтительным при остром ПД [30, 31]. Поскольку предполагается, что ОПП разрешится в течение дней – недель с последующим удалением катетера, то не требуется его прочная фиксация в подкожном тоннеле и исчезает необходимость во 2-й манжетке.
2. Приемлемой альтернативой может быть установка катетера для ПД (в том числе и Тенкхоффа) с использованием техники Сельдингера.

Гибкий многоцелевой дренажный катетер Cook Mac-Loc (рис. 1С) является альтернативой катетеру Тенкхоффа, который можно вводить под местной анестезией у постели ребенка любого возраста с использованием техники Сельдингера (слепая

чрескожная пункция брюшной полости – введение в иглу проводника – удаление иглы – введение и удаление по проводнику расширителя – проведение катетера) [32]. Для недоношенных детей и новорожденных используются катетеры размерами 5F и 6F, в возрасте от 1 месяца до 1 года – 8,5F, от 6 мес. до 2 лет – 10,2F, от 1 года до 5 лет – 12F. Проблемой первых двух катетеров является их частая обструкция из-за малого размера боковых отверстий, поэтому ПД-катетер 8,5F наиболее часто используется и у самых маленьких пациентов [28, 32].

3. Жесткие катетеры, устанавливаемые с помощью стилета, следует использовать только при отсутствии мягких катетеров (Тенкхоффа или многоцелевых дренажных), при этом продолжительность их использования должна быть ограничена 3 днями, чтобы минимизировать риск инфекционных осложнений.
4. Импровизированные катетеры (назогастральный зонд, хирургический дренаж, центральный венозный или гемодиализный катетер, уретральный катетер Фолея и др.) для проведения ПД следует использовать только при отсутствии стандартных ПД-катетеров.
5. Рекомендуется профилактическое введение антибиотика (АБ): цефазолина в дозе 20 мг/кг в/в за 1 час до имплантации ПД-катетера (в качестве альтернативы может рассматриваться ванкомицин или другой АБ в зависимости от результатов локального мониторинга флоры и чувствительности АБ к ней) [33].
6. Следует использовать закрытую систему доставки с Y-образным соединением (рис. 1А). При выполнении ручного ПД у маленьких детей следует использовать систему с бюретками для точного контроля объема заливаемого и сливаемого раствора (рис. 1D).
7. В условиях ограниченных ресурсов может использоваться открытая система с прокалыванием специальных портов мешков для ПД, однако количество таких проколов должно быть минимизировано для профилактики инфицирования диализного раствора.
8. Автоматический перитонеальный диализ (АПД) с использованием циклера подходит для лечения детского ОПП, за исключением новорожденных, для которых объемы обмена слишком малы для имеющихся в настоящее время аппаратов. Проведение АПД возможно при объеме залива ПД-раствора 100 мл и выше для всех имеющихся на рынке моделей циклеров.

В специализированных детских диализных центрах Беларуси, России, Казахстана организация доступа для ПД у детей с ОПП осуществляется путем хирургической имплантации открытым способом прямого или с завитком катетера Тенкхоффа с одной манжеткой, с формированием подкожного тоннеля и выведением катетера на кожу вверх (рис. 2). Обязательно используется иммобилизация катетера для профилактики механических повреждений и быстрее заживления места его выхода на кожу, а также наложение стерильной повязки на послеоперационные раны (рис. 2). Установка катетера Тенкхоффа или многоцелевых дренажных катетеров по методике Сельдингера не применяется из-за высоких рисков повреждения кишечника при пункции, несмотря на УЗИ или рентгеноскопический контроль. Эта методика распространена в странах с ограниченными ресурсами, где возможность хирургической имплантации ограничена [34, 35]. У детей раннего возраста в пОИТ могут использоваться многоцелевые или импровизированные катетеры, но имплантироваться они должны только хирургически. Жесткие катетеры применяются в



Рис. 2. Имплантация ПД-катетера: 1 – место установки катетера в брюшную полость; 2 – подкожный тоннель; 3 – место выхода ПД-катетера на кожу; 4 – иммобилизация катетера пластырем; 5 – повязка, закрывающая послеоперационную рану и место выхода катетера
Fig. 2. PD catheter implantation: 1 – catheter implantation site into abdominal cavity; 2 – subcutaneous tunnel; 3 – catheter exit site to the skin; 4 – catheter immobilization with a layer; 5 – dressing covering the postoperative wound and catheter exit site

клинической практике крайне редко. Если у ребенка во время хирургической установки ПД-катетера резецировали сальник, то после операции у него сразу можно использовать АПД. Если же сальник не удалялся, то начинать следует с «ручного» ПД у маленьких детей с использованием систем с бюретками (рис. 1D), а у более старших пациентов – систем с Y-образным соединением и мешками (рис. 1A) с контролем объема заливаемого и сливаемого раствора с помощью ручных пружинных весов (типа безмен), с возможностью последующего перехода на АПД через 2–4 дня. Это связано с тем, что современные циклеры используют активное нагнетание и забор ПД-раствора из брюшной полости, а при создании отрицательного давления при заборе диализата происходит «засасывание» не только жидкости, но и сальника, что может привести к обструкции катетера. В большинстве диализных центров, имеющих технические возможности, стараются переводить пациентов с «ручного» ПД на АПД, что существенно облегчает среднему медицинскому персоналу уход за ребенком.

Растворы для ПД

Представляют собой растворы электролитов, содержащие глюкозу и буфер (лактат и/или бикарбонат) (табл. 3). В клинической практике коммерчески доступны пакеты (мешки) с ПД-растворами объемом 2, 2,5, 3 и 5 литров, которые изготовлены из материала, не содержащего поливинилхлорид и пластификаторы.

Таблица 3
Состав коммерчески доступных ПД-растворов

Table 3
Composition of some commercially available PD fluids

Тип раствора	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Лактат	pH	Осмолярность, мосм/л
	ммоль/л								
Баланс 1,5%	134	0	1,25/1,75	0,5	100,5	0	35	7,0	356
Дианил 1,36%	132	0	1,25/1,75	0,25	95	0	40	5,2	344
Физионил 1,36%	132	0	1,25/1,75	0,25	101	25	10	7,5	345
Бикавера 1,5%	134	0	1,25/1,75	0,5	104,5	34	0	7,4	358

ISPD рекомендует использовать только коммерчески приготовленные растворы для ПД [28]. Состав раствора для острого ПД должен включать декстрозу в концентрации, рассчитанной на достижение целевой УФ. Коммерчески доступны ПД-растворы с концентрацией декстрозы 1,5%, 2,5% и 4,25% (1,36%, 2,27% или 3,86% для глюкозы соответственно). Осмолярность 1,5%, 2,5% и 4,25% растворов составляет 346, 396 и 485 мосмоль/л соответственно, и их использование приводит к осмотическому градиенту между диализатом и плазмой, что способствует удалению жидкости из организма, объем которой увеличивается при повышении концентрации декстрозы/глюкозы ПД-раствора. Острый ПД обычно начинают с 2,5% раствора глюкозы для достижения эффективной УФ при наличии умеренной или выраженной гипергидратации. Первоначальное использование 1,5% раствора может быть целесообразным при эволемии или легкой перегрузке жидкостью. Можно также получить промежуточную концентрацию глюкозы путем смешивания разных объемов из мешков с разной концентрацией глюкозы, вводимых через бюретки ПД-системы для маленьких детей (рис. 1D). Например, добавление в бюретку по 100 мл 1,5% раствора с одного пакета и 2,5% из другого позволяет получить концентрацию диализирующего раствора 2,0%. Кроме того, если доступен только 1,5% ПД-раствор, то с помощью добавления глюкозы для внутривенного введения можно добиться необходимой концентрации для увеличения УФ (например, в 2-литровый пакет с ПД-раствором необходимо добавить 50 мл или 137,5 мл 40% глюкозы, чтобы добиться концентрации 2,5% или 4,25% соответственно).

ISPD рекомендует при дисфункции печени, гемодинамической нестабильности и стойком/ухудшающемся метаболическом ацидозе отдавать предпочтение ПД-растворам, содержащим бикарбонат (табл. 3). Если эти растворы недоступны, альтернативой остаются растворы с лактатным буфером [28]. Это связано с тем, что лактат, всасываясь в кровь из диализного раствора, в печени превращается в бикарбонат и предотвращает развитие метаболического ацидоза. При состояниях, на которых акцентирует внимание ISPD, процесс метаболизма лактата часто нарушается, что может приводить к лактатацидозу.

Протокол процедуры острого ПД

Протокол процедуры острого ПД должен быть индивидуальным в соответствии с массой тела ребенка и его клиническим состоянием (табл. 4). Очень важным моментом является начальный объем залива ПД-раствора в брюшную полость, который должен быть минимальным (10 мл/кг), особенно у маленьких детей, чтобы избежать его протечки вследствие повышения внутрибрюшного давления [36]. Если протечки

раствора не отмечается в течение 1–3 дней, то объем обмена можно постепенно увеличивать, но не рекомендуется превышать 30 мл/кг (800 мл/м²) у детей первого года жизни и 40 мл/кг (1100 мл/м²) у более старших детей [28, 36, 37]. Первоначальная продолжительность обмена (включая время залива, экспозиции и слива) должна составлять 60–90 мин. с последующим увеличением до 120–240 мин. по мере увеличения объема залива ПД-раствора. В некоторых случаях требуются более короткие (<60 мин.) интервалы обмена, например, у недоношенных детей с экстремально низкой (<1000 г) и очень низкой (<1500 г) массой тела при рождении, у которых успешно использовались меньшие объемы залива (7–14 мл) и более короткое время экспозиции (10–20 мин.) [38]. Различные режимы, адаптированные для хронического ПД, могут использоваться при ОПП, но нет убедительных доказательств преимущества какого-либо из них [37]. В большинстве случаев используется стандартный режим АПД с заданием определенного объема и концентрации ПД-раствора, длительности экспозиции в брюшной полости с последующим пересмотром программы лечения каждые 1–3 дня. ПД или АПД продолжается круглосуточно, ежедневно до восстановления функции почек пациента с небольшими перерывами на замену систем магистралей и мешков с растворами. Тщательный мониторинг общего поступления и выведения жидкости, массы тела обязателен с целью достижения и поддержания нормотензии и зуволемии [28]. Концентрацию электролитов в сыворотке следует измерять по крайней мере ежедневно, и после первых 12–24 ч. может потребоваться добавление натрия и/или калия в диализирующий раствор (табл. 4) [28, 36], хотя в ряде диализных центров предпочитают внутривенное введение данных электролитов. При остром ПД следует скорректировать дозы лекарственных препаратов в зависимости от СКФ и при возможности осуществлять мониторинг их уровня в крови. Необходимо помнить, что эффективная скорость фильтрации на ПД для большинства лекарственных средств составляет <10 мл/мин/1,73 м². Распространенной практикой является добавление гепарина (500 МЕ/л) в диализирующий раствор для предотвращения образования фибриновых сгустков у пациентов после имплантации ПД-катетера на время геморрагического окрашивания диализата (1–3 дня) [28].

Таблица 4

Протокол острого ПД у детей и его изменения при развитии различных состояний и осложнений [28]

Table 4

Protocol for acute PD in children and its modification in various conditions and complications [28]

Начальный протокол острого ПД	
Объем залива диализирующего раствора: 10–20 мл/кг. Полный цикл 60–90 мин.: залив: 5–10 мин., экспозиция в брюшной полости: 30–60 мин., слив: 10–20 мин. Начальная концентрация глюкозы: 2,5%. Гепарин: 500 МЕ/л ПД-раствора. Длительность: ПД в течение полных 24 ч. в течение 1–3 дней	
Состояния и осложнения	
Недостаточная ультрафильтрация	
–	Исключить проблемы с ПД-катетером или протечку ПД-раствора мимо катетера.
–	Увеличить концентрацию глюкозы (1,5%→2,5%→4,25%) (или 1,36%→2,27%→3,86%).
–	Уменьшить продолжительность обмена, сократив время пребывания на ±25% (сократить время залива и слива до минимума).
–	Увеличить объемы залива до 30–40 мл/кг (800–1100 мл/м ²).
–	Рассмотреть возможность проведения проточного ПД (ППД)

Окончание таблицы 4

Гиперкалиемия, требующая экстренного лечения
<ul style="list-style-type: none"> – Сократите время экспозиции до 15–30 мин. (сократите время залива и слива до минимума). – Регулярно контролируйте уровень калия
Калий в сыворотке <4 ммоль/л
Добавьте 4 ммоль/л калия в мешок с ПД-раствором
Трудности с вентиляцией / повышенное внутрибрюшное давление
<ul style="list-style-type: none"> – Постепенно уменьшайте объем залива на 5 мл/кг. – Расположите пациента в полуположении Фаулера (голова и туловище подняты на 30°). – Рассмотрите возможность измерения внутрибрюшного давления для определения объема заполнения (либо внутрипузырного давления с помощью датчика через мочевого катетер, либо непосредственно из катетера ПД с помощью манометра). – Рассмотрите возможность проведения ППД с очень низкими объемами залива ПД-раствора
Выраженная гиперфосфатемия
<ul style="list-style-type: none"> – Допускается, если не вызывает клинических проблем и ожидается скорое разрешение ОПП. Если проблематично: <ul style="list-style-type: none"> – Увеличить время экспозиции >60 мин. – Увеличить объемы залива до 30–40 мл/кг (800–1100 мл/м²)
Гипернатриемия, вторичная по отношению к частым обменам
<ul style="list-style-type: none"> – Увеличить время экспозиции >60 мин. – Уменьшить концентрацию глюкозы в диализирующем растворе, если это возможно
Гипернатриемия, ОПП и необходимость диализа
Добавьте гипертонический раствор NaCl (3% или 5%) в ПД-раствор с достижением концентрации меньше на 15 ммоль по сравнению с Na крови пациента, чтобы обеспечить постепенное снижение уровня Na в сыворотке
Лактацидоз И нарушение функции печени, ИЛИ шок, ИЛИ новорожденный И/ИЛИ не реагирующий на ПД-растворы на основе лактата
Используйте ПД-растворы с бикарбонатным буфером
Гипергликемия >20 ммоль/л
<ul style="list-style-type: none"> – Используйте ПД-раствор с меньшей концентрацией глюкозы, если это возможно, и/или увеличьте продолжительность обменов. – Если эффекта не получено или невозможно № 1: инфузия инсулина (начните с 0,05 МЕ/кг/ч) ИЛИ – Добавьте инсулин в ПД-раствор
Появление гидроторакса
<ul style="list-style-type: none"> – Рассмотрите возможность проведения иГД или НПЗТ, если он доступен. – Пункция и установка плеврального дренажа, контроль уровня глюкозы в полученной жидкости. – Расположите пациента в полуположении Фаулера (голова и туловище подняты на 30°). – Уменьшите объем залива ПД-раствора. – Учитывайте объем плевральной жидкости по дренажу в расчете суточного гидробаланса

Проточный ПД (ППД) относится к одному из модифицированных вариантов ПД, когда желательное увеличение клиренса растворенных веществ и УФ или когда предпочтительно использование только очень малых объемов диализирующего раствора (например, у новорожденных, при высоком давлении в контуре аппарата ИВЛ, а также после операций на органах брюшной полости, если проведение иГД, НЗПТ невозможно) [28, 39]. Терапию с помощью этой методики следует считать экспериментальной. Протокол лечения ППД подробно представлен в статье P. Nourse с соавт. (2021) [28].

Таким образом, ПД остается одним из лидирующих методов ЗПТ у детей с ОПП и предпочтительным у новорожденных и детей раннего возраста, а также при отсутствии возможности проведения других методов ЗПТ, наличии противопоказаний к антикоагулянтной терапии и тяжелой сердечной недостаточности [1, 28, 39, 40].

Успех методики в большинстве случаев определяется эффективностью хирургической имплантации ПД-катетера и отсутствием осложнений, с ним связанных.

■ ИНТЕРМИТТИРУЮЩИЙ ГЕМОДИАЛИЗ

Проведение иГД возможно только в специализированных педиатрических диализных центрах, поскольку для этого требуются не только аппараты для гемодиализа («искусственная почка»; рис. 3А) и подготовленный персонал для работы с ними, но и наличие водоочистки (рассчитана как минимум на 3–6 диализных мест, рис. 3В) для приготовления ультрачистой воды, которая является неотъемлемой составляющей диализного раствора. Именно последнее обстоятельство не позволяет использовать этот метод ЗПТ повсеместно. По этой причине, а также из-за ограниченных показаний для иГД при ОПП частота его применения уступает ПД и НПЗТ, составляя 22,4% среди европейских детских нефрологических центров в 2019 году [26].

Интермиттирующий гемодиализ обеспечивает наиболее эффективное удаление растворенных веществ и УФ по сравнению с другими методами ЗПТ. У гемодинамически стабильного пациента ни один другой метод ЗПТ не позволяет так быстро вывести из организма низкомолекулярные вещества и жидкость, поэтому иГД наиболее эффективен при лечении (табл. 1 и 2) острых и опасных для жизни нарушений (гиперкалиемия, ацидоз, отек легких и др.), при отравлениях (литий, аспирин и др.),

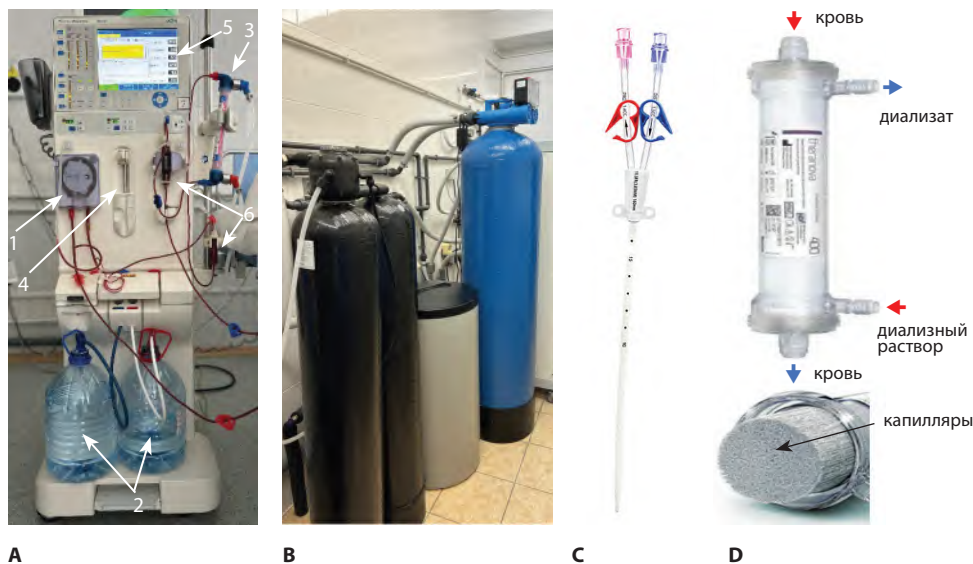


Рис. 3. Техническое обеспечение процедуры гемодиализа: А – аппарат гемодиализа (1 – насос кровопроводящей магистрали, 2 – кислый и щелочной компонент диализирующего раствора, 3 – диализатор, 4 – ложе для шприца с гепарином, 5 – панель контроля диализа, 6 – артериальная и венозная ловушка); В – водоочистка; С – 2-просветный временный гемодиализный катетер; D – диализатор / поперечный срез диализатора
Fig. 3. Technical support of hemodialysis procedure: A – hemodialysis machine (1 – blood line pump, 2 – acidic and alkaline components of the dialysate, 3 – dialyzer, 4 – heparin syringe holder, 5 – dialysis control panel, 6 – arterial and venous trap); B – water purification; C – double-lumen temporary hemodialysis catheter; D – dialyzer / cross section of dialyzer

Таблица 5
Педиатрические центральные венозные катетеры для экстракорпоральной заместительной почечной терапии [1, 41]

Table 5
Pediatric central venous catheters for extracorporeal kidney replacement therapy [1, 41]

Масса тела	Тип и размер катетера	Место установки катетера
Новорожденные	2-просветный, 6,5–7F	Бедренная вена или артерия
3–6 кг	2- и 3-просветный, 6,5–7F	Яремная, подключичная или бедренная вены
6–30 кг	2-просветный, 8F	Яремная, подключичная или бедренная вены
>15 кг	2-просветный, 9F	Яремная, подключичная или бедренная вены
>30 кг	2-просветный – 10F, 3-просветный – 12F	Яремная, подключичная или бедренная вены

токсичности лекарств (ванкомицин и др.), синдроме лизиса опухоли и гипераммониемии [4, 14].

Доступ, выбор ГД-катетера

Сосудистый доступ является одним из важнейших компонентов, необходимых для проведения эффективного ИГД. Временные (без манжеты) центральные венозные катетеры (ЦВК) позволяют обеспечить сосудистый доступ у детей с ОПП, нуждающихся в срочном ИГД (рис. 3) [1, 4, 41]. Выбор подходящего катетера основан на его размере (диаметре (французская шкала наружных диаметров – F) и длине), который зависит от массы тела ребенка и предполагаемого местоположения (табл. 3) [1, 41]. Размеры 2-просветных катетеров варьируют от 6,5F до 14F, позволяя добиться максимальных скоростей кровотока по ним от 140 мл/мин до более 400 мл/мин [42]. Следует выбирать наибольший диаметр ЦВК, который можно безопасно имплантировать, чтобы добиться оптимального кровотока и выживаемости экстракорпорального контура. Однако слишком большой катетер может привести к обструкции сосуда со снижением венозного возврата и эффективности диализа [1, 4, 43]. У недоношенных детей катетер 6,5F может оказаться слишком большим, и в этом случае для обеспечения адекватного сосудистого доступа потребуются постановка двух однопросветных ЦВК в разные вены, включая пупочные [1, 4, 41]. Согласно рекомендациям KDIGO правая внутренняя яремная вена должна быть первым местом выбора постановки ЦВК для диализа, за ней следуют бедренная вена, левая внутренняя яремная вена и подключичная вена [2]. В современной клинической практике для оптимального выбора размера катетера и места его установки рекомендуется проведение ультразвукового исследования предполагаемых для пункции сосудов.

Оборудование и мембраны

Ключевым элементом экстракорпорального контура, где происходит обмен веществ между кровью и диализирующим раствором, является диализатор (рис. 3А и 3D). По своей структуре он состоит из пластмассового корпуса цилиндрической формы, в который заключены тысячи капилляров (полых волокон), с 4 портами: 2 из которых связаны с кровью, а 2 других с диализирующим раствором (рис. 3D). Во время процедуры гемодиализа внутри капилляров, стенка которых представлена полупроницаемой мембраной, течет кровь, а снаружи в обратном направлении движется диализирующий раствор (рис. 3А). К основным физическим процессам гемодиализа,

обеспечивающим очищение крови от «шлаков» и удаление излишка жидкости из организма, относятся диффузия и УФ. Эффективность мембраны по выведению ряда веществ из организма зависит от следующих факторов [44, 45]:

- Молекулярная масса растворенного вещества. К низкомолекулярным веществам относятся натрий (23 Да), фосфор (31), калий (35), мочевины (60), фосфаты (80) и креатинин (113); к среднемолекулярным: мочевая кислота (168), глюкоза (180), витамин B_{12} (1355); к крупномолекулярным: инулин (5200), β_2 -микроглобулин (11 800), миоглобин (17 800), медиаторы воспаления (1200–40 000), альбумин (55 000–60 000) и др. Небольшие молекулы, такие как мочевины и креатинин, быстро выводятся при иГД, а крупные молекулы (например, β_2 -микроглобулин) не могут пройти через поры стандартных (низкопоточных – low-flux) диализных мембран, но проходят через поры большего размера в высокопоточных (high-flux) диализаторах.
- Площадь поверхности диализатора. Чем больше площадь поверхности диализатора, тем выше у него способность к удалению растворенных веществ.
- Эффективный размер пор. Использование мембран для гемодиализа с высокой пропускной способностью (с увеличенным размером пор до 8–10 нм) позволяет удалять более крупные токсины и молекулы.
- Скорость кровотока. Клиренс растворенных веществ увеличивается пропорционально увеличению скорости кровотока.
- Скорость потока диализирующего раствора: чем она выше, тем выше эффективность диффузии мочевины из крови в диализат. Оптимальная скорость потока диализирующего раствора должна быть в 1,5–2,0 раза выше скорости кровотока. При превышении этого значения эффективность диффузии значительно снижается.
- Трансмембранное давление (ТМД). Разница давлений между потоками диализата и крови приводит к фильтрации воды из плазмы и является движущей силой УФ.
- Коэффициент ультрафильтрации (K_{UF}) – это объем жидкости, фильтрующийся через диализную мембрану за час при ТМД 1 мм рт. ст. (мм Hg). Диализаторы с высоким K_{UF} позволяют добиваться наибольшей УФ.
- Коэффициент массопереноса (K_0A) – это параметр диализатора, отражающий максимальный теоретический клиренс (в мл/мин) определенного растворенного вещества в условиях неограниченных произвольных потоков крови и диализирующего раствора. Диализаторы подразделяют на низко-/средне-/высокоэффективные в зависимости от K_0A мочевины – <500/500–700/>700 мл/мин соответственно. Чем выше эффективность, тем выше клиренс низкомолекулярных растворенных веществ.
- Проницаемость мембраны. Мембраны для диализаторов также классифицируют на низкопоточные (low-flux) и высокопоточные (high-flux) в зависимости от их K_{UF} и клиренса крупных молекул (табл. 6). Высокопроницаемые мембраны имеют большие поры, способные пропускать крупные молекулы (например, β_2 -микроглобулин), а также обладают высокой водопроницаемостью с $K_{UF} > 20$ мл/ч на мм Hg. Для низкопоточных мембран K_{UF} , как правило, менее 8 мл/ч на мм Hg (табл. 6).

Таблица 6
Характеристики низко- и высокопоточных диализаторов
Table 6
Characteristics of low- and high-flux dialyzers

Тип	Низкопоточные								Высокопоточные					
	FX5	FX8	F3	F4	F5	F6	F7	F8	FXpaed	FX40	FX50	FX60	FX80	FX100
S, м ²	1,0	1,4	0,4	0,7	1,0	1,3	1,6	1,8	0,2	0,6	1,0	1,4	1,4	2,2
K _{уф}	8	12	1,7	2,8	4,0	5,5	6,4	7,5	7	20	33	46	59	73
V, мл	54	74	28	42	63	74	96	113	18	32	53	74	95	116
Q _в , мл/мин	100–300	150–400	50–200	50–200	100–300	150–400	200–500	250–600	30–100	50–200	100–300	150–400	200–500	250–600
Мембрана	Helixone		Polysulfone						Helixone					

Примечания: S – площадь поверхности диализатора, м²; K_{уф} – коэффициент ультрафильтрации, мл/ч на мм Hg; V – объем заполнения диализатора, мл; Q_в – рекомендуемый диапазон скорости кровотока, мл/мин.

Эффективность мембраны диализатора по удалению растворенных веществ рассчитывается как произведение площади поверхности мембраны на ее проницаемость для определенного вещества.

Информация, которая обычно сообщается о диализаторе, включает K_{уф}, клиренс мочевины, креатинина, витамина B₁₂, фосфатов и инулина, площадь поверхности мембраны, объем заполнения, длину и толщину волокон.

Диализные мембраны бывают двух типов: целлюлозные и синтетические. Последние относятся к биосовместимым и намного чаще используются в клинической практике (табл. 6).

Схематично аппарат для гемодиализа можно разделить на два контура: крови и диализирующего раствора, которые пересекаются в диализаторе и разделены полупроницаемой мембраной капилляров (рис. 3А и 3D).

Контур крови состоит из артериального сегмента, который представлен магистральями, соединяющими артериальный конец (красный, рис. 3С) гемодиализного катетера и диализатор. Забор крови от пациента осуществляется с помощью специального роликового насоса с очень высокой скоростью 100–600 мл/мин, которую можно обеспечить только при заборе крови через центральные вены (яремную, бедренную, подключичную). Такая скорость кровотока необходима для оптимального очищения организма от «шлаков» при минимальной затрате времени (в среднем за 4 часа). В постнасосной части магистралей располагается порт для инфузии гепарина. Венозный сегмент (линия возврата) начинается от диализатора и продолжается до венозного конца (синий, рис. 3С) ГД-катетера. Контур крови включает датчики контроля артериального и венозного давления в магистральных, ТМД и детекции воздуха, необходимые для обеспечения безопасности процедуры.

Контур диализирующего раствора

Диализирующий раствор готовят из очищенной воды и концентратов, причем последние содержат электролиты, необходимые для получения диализирующего раствора заданного состава. Данный контур состоит из 5 составляющих: системы очистки воды; системы пропорционального смешивания; нагревания и дегазации; мониторинга и тревог; контроля УФ.

Водоочистка. Вода для стандартного гемодиализа должна содержать менее 100 колониеобразующих единиц (КОЕ)/мл и менее 0,25 эндотоксиновых единиц (ЭЕ) /мл, а ультрачистая вода для высокопоточного диализа или получения раствора в режиме онлайн – менее 0,1 КОЕ/мл и менее 0,03 ЭЕ/мл соответственно. Современные водоочистки состоят из каскада фильтров (колонок). Чтобы добиться высокой степени чистоты, водопроводная вода проходит через колонку с песком, затем колонки с активированным углем и ионообменной смолой (умягчителем), затем через мембрану обратного осмоса и бактериальный фильтр (рис. 3В). После этого вода поступает в распределительную систему труб и направляется к гемодиализным аппаратам, где происходит приготовление диализирующего раствора в режиме онлайн.

Система пропорционального смешивания. Аппараты для гемодиализа смешивают концентраты электролитов (жидкие или сухие) с очищенной водой для получения готового диализирующего раствора, который затем подается в диализатор. Используются два типа концентратов: А (кислотный), включающий натрий (Na), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), хлор (Cl), уксусную кислоту и декстрозу, и В (щелочной), содержащий Na, Cl и бикарбонат. Компоненты А и В смешиваются в определенной пропорции с ультрачистой водой: 1 : 34 : 1,83 (кислота : вода : щелочь). В готовом диализирующем растворе достигаются следующие концентрации: Na – 135–145 ммоль/л, K – 0–4 ммоль/л, Ca – 1,25–3,0 ммоль/л, Mg – 0,375–0,75 ммоль/л, Cl – 99–124 ммоль/л, бикарбонат – 30–40 ммоль/л, декстроза – 11,1 ммоль/л.

Нагрев и дегазация. Диализирующий раствор должен подаваться при температуре 35–38 °С, поэтому его необходимо подогревать для предотвращения вазоконстрикции у пациента. Дегазация осуществляется путем воздействия отрицательного давления на подогретую воду.

Мониторинг и сигналы тревоги в контуре диализирующего раствора:

- *Проводимость.* Неисправность системы дозирования может привести к образованию чрезмерно разбавленного или концентрированного диализирующего раствора. Нормальный диапазон проводимости (в основном определяется концентрацией Na) диализирующего раствора составляет 12–16 мСм/см. Если значения проводимости выходят за пределы диапазона, то диализат отводится в дренаж.
- *Температура.* Если температура диализирующего раствора, измеренная датчиком, выходит за пределы диапазона 35–38 °С, диализный раствор отводится в дренаж.
- *Детектор утечки крови:* устанавливается в линии оттока диализата. Если детектор обнаруживает кровь, активируется сигнал тревоги и поток крови через диализатор останавливается.
- *Управление ультрафильтрацией.* Наиболее передовым методом управления УФ является волюметрический метод. Отдельная линия, отходящая от линии оттока диализата, проходит через насос, который задает скорость УФ. Насос управляется центральным микропроцессором, который отслеживает требуемую и общую скорость УФ.

Протокол процедуры гемодиализа (табл. 7) при ОПП у детей требует частой корректировки и должен учитывать массу и состав тела, наличие катаболического состояния, целевой уровень УФ и изменения нутритивных потребностей.

Таблица 7
Протокол интермиттирующего гемодиализа у детей с ОПП [1, 44–51]
Table 7
Protocol for acute intermittent hemodialysis in AKI children [1, 44–51]

Измерение массы и длины тела с расчетом площади поверхности тела (ППТ) ребенка по формуле ($= \text{Вес (кг)}^{0,5} \times \text{Рост(см)}^{0,5} / 60$ или $\sqrt{\text{Вес (кг)} \times \text{Рост(см)} / 3600}$) или с помощью интернет-калькуляторов [46, 47]
Сосудистый доступ: определение места имплантации 2–3-просветного гемодиализного катетера, его типа, размера и длины (табл. 5)
Продолжительность сеанса иГД определяется клиническим состоянием пациента, степенью гипергидратации и/или гиперкалиемии. У пациентов с высокими уровнями мочевины крови (>35 ммоль/л) при ее быстром выведении на ГД имеется риск развития дизэквилибриум-синдрома (ДС) с отеком головного мозга и неврологической симптоматикой. Продолжительность первого сеанса иГД не должна превышать 2 часов, включая 1–1,5 часа диализа (диффузии) и, в случае необходимости, время изолированной УФ. Для предотвращения ДС доля снижения мочевины за сеанс (ДСМ = ((мочевина до диализа – после диализа) / до диализа) \times 100%) должна быть $<30\%$. ДСМ зависит от размеров диализатора, скорости кровотока и длительности диализа. Если до иГД уровень мочевины >40 ммоль/л и натрия <133 ммоль/л, осмолярность крови >300 мОсм, следует рассмотреть вопрос назначения инфузии маннитола 0,25 г/кг в течение первого часа сеанса. Если уровень мочевины перед вторым сеансом иГД <35 ммоль/л, то его длительность может быть увеличена до 3 часов. Короткие сеансы могут проводиться ежедневно, с постепенным увеличением продолжительности до 3–4 часов с переходом на 3 раза в неделю. Пациенты с острой печеночной недостаточностью, в том числе на фоне хронической печеночной недостаточности, с острым или хроническим повреждением головного мозга, заболеваниями с повышенной проницаемостью гематоэнцефалического барьера особенно подвержены риску развития ДС на диализе, и для них рекомендуется проведение низкоэффективного иГД [48]
Выбор диализатора базируется на ППТ, $K_{\text{уд}}$ и $K_{\text{оА}}$ мочевины. У детей с ОПП предпочтение должно отдаваться иГД с высокопоточным диализатором, а не иГД с гемофильтрацией онлайн. Площадь поверхности диализатора (ППД) не должна превышать ППТ пациента. Большая ППД обеспечивает лучший клиренс веществ и воды, но увеличивается риск ДС. По этой причине для первого сеанса иГД лучше использовать диализатор с площадью поверхности около 75% ППТ
Экстракорпоральный контур (ЭК) включает в себя объем крови в иглах, диализаторе и магистралах (артериальном и венозном сегментах). Ребенок бессимптомно может переносить забор 8–10% крови от объема циркулирующей крови (ОЦК) в ЭК. ОЦК составляет у новорожденных 100 мл/кг, у детей – 80 мл/кг, у подростков и взрослых – 60 мл/кг. Суммарный объем заполнения диализатора (табл. 6) и магистралей (для новорожденных – 56 мл, детей – 117–126 мл, взрослых – 161–172 мл) не должен превышать 10% ОЦК. Превышение этого объема может приводить к гиповолемии, гипотонии и шоку
Предзаполнение – это процесс, при котором диализатор и магистралы промываются 0,9% раствором хлорида натрия (0,9% р-р NaCl) и заполняются им для удаления воздуха и дезинфицирующего раствора. Затем артериальный конец магистралы присоединяется к ГД-катетеру пациента и включается насос аппарата, а венозный сегмент остается открытым, чтобы удалить 0,9% р-р NaCl из системы по мере поступления в нее крови. После полного заполнения контура кровью венозный сегмент присоединяется к ГД-катетеру. Если общий объем заполнения ЭК превышает 10% от ОЦК пациента, рекомендуется его предварительное заполнение 5% раствором альбумина или кровью (эритроцитарной массой, разбавленной 0,9% р-р NaCl до гематокрита 30–40%) для предотвращения возникновения гипотензии и гемодинамической нестабильности [49–51]
Прямо- или противоток. Когда потоки крови и диализата движутся в одном направлении, это называется прямотоком, или конкурирующим потоком, а если в противоположном направлении – противоток. В первом случае клиренс низкомолекулярных веществ (мочевины) снижается приблизительно на 20%, и поэтому такой вариант подключения предпочтителен при первых сеансах иГД у пациентов с риском ДС. Противоточный вариант подключения используется при последующих процедурах диализа
Скорость кровотока обычно составляет 5–8 мл/кг/мин и зависит от размеров катетера и пациента. Для детей раннего возраста жизни предпочтительнее более низкая скорость (2–3 мл/кг/мин с постепенным увеличением до максимума 5 мл/кг/мин). Во время первого сеанса иГД для предотвращения ДС рекомендуется скорость кровотока 2–3 мл/кг/мин [49, 52]
Скорость потока диализата должна быть как минимум в 1,5 раза больше скорости кровотока, чтобы обеспечить эффективное выведение растворенных веществ. Обычно для детей используется скорость потока диализата от 300 до 500 мл/мин

Окончание таблицы 7

Ультрафильтрация. Скорость УФ 10 мл/кг/ч является безопасной отправной точкой и не должна превышать 12 мл/кг/ч или более 5% массы тела за сеанс. При первом сеансе иГД у пациентов с выраженной гипергидратацией может быть изначально проведена изолированная УФ, а затем диализ. Крайне важно избегать гипотонии в любое время сеанса иГД, поскольку это может ухудшить почечную перфузию и отразиться на последующем восстановлении функции почек
Состав диализирующего раствора может быть скорректирован в соответствии с конкретными терапевтическими потребностями. Уровень натрия в диализате не должен отличаться более чем на 10 ммоль/л от уровня натрия в крови, чтобы избежать развития ДС, особенно при первом сеансе иГД. Если уровень калия в крови до диализа <4 ммоль/л, то его концентрация в диализирующем растворе должна быть повышена до 3,0–3,5 ммоль/л (стандартный уровень 2 ммоль/л), если в крови >7 ммоль/л, то должен использоваться диализат без калия
Антикоагуляция экстракорпорального контура является обычной, но не обязательной процедурой и должна определяться путем оценки риска кровотечения и тромбообразования в контуре. Препаратом выбора остается нефракционированный гепарин. Стандартный режим включает болюс гепарина перед процедурой 15–20 ЕД/кг (до 40 ЕД/кг), далее титрование со скоростью 15–20 ЕД/кг/час. За 30 минут до окончания сеанса иГД подача гепарина в контур прекращается
Эффективность иГД. Хотя не существует общепринятых методов оценки эффективности иГД при ОПП, в соответствии с рекомендациями KDIGO, у пациентов с ОПП необходимо достигать клиренса низкомолекулярных веществ, эквивалентного значению $Kt/V_{1,2}$ за сеанс (что примерно соответствует коэффициенту снижения мочевины не менее 70%), не реже трех раз в неделю [2]

Таким образом, иГД считается предпочтительным вариантом диализа в случаях, требующих быстрого и эффективного удаления растворенных веществ и жидкости у гемодинамически стабильных пациентов с адекватным сосудистым доступом.

■ МЕТОДИКИ НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬНОЙ ПОЧЕЧНОЙ ТЕРАПИИ (НВВГД, НВВГФ, НВВГДФ)

НЗПТ является предпочтительным методом поддержки функции почек у детей в критическом состоянии и с нестабильной гемодинамикой в пОИТ, поскольку позволяет постепенно удалять жидкость и растворенные вещества из организма. Наиболее частыми показаниями к НЗПТ являются ОПП и перегрузка жидкостью, а также не связанные с нарушением функции почек показания, такие как выведение токсичных метаболитов при острой печеночной недостаточности, врожденных нарушениях метаболизма, интоксикации и удаление медиаторов воспаления при сепсисе [20].

У всех методик НЗПТ есть как общие черты, так и различия (табл. 1 и 2). К общим относится то, что они непрерывные (длительность процедуры >24 часа) и вено-венозные (забор «зашлакованной» и возврат «очищенной» крови осуществляется из вены в вену – чаще в разные просветы ЦВК (рис. 3С)). Различия включают как принципы удаления (диффузия и/или конвекция) веществ, так и механизмы их осуществления. Основным методом детоксикации при непрерывном вено-венозном гемодиализе является диффузия, которая подробно описана ранее в разделе иГД: из крови, которая течет внутри капилляра гемофильтра (для НЗПТ диализатор называют гемофильтром, рис. 3D, 4/1), по градиенту концентрации низкомолекулярные вещества фильтруются в диализирующий раствор, который движется в обратном направлении снаружи полупроницаемой мембраны капилляра (рис. 3А и 3D). Принцип непрерывной вено-венозной гемофильтрации основан на конвекции – в кровоток экстракорпорального контура поступает диализирующий раствор (называется субституат, или замещающий раствор, в данном случае он находится не снаружи, а внутри капилляра), который фильтруется через полупроницаемую

мембрану гемофильтра в режиме онлайн, увлекая за собой не только низко-, но и среднемoleкулярные вещества. Когда замещающий раствор вводится в экстракорпоральный контур до гемофильтра – это НВВГФ с предилюцией, а если после – с постдилюцией. Непрерывная вено-венозная гемодиализация включает в себя комбинацию методик НВВГД и НВВГФ и оба принципа (диффузию и конвекцию).

В настоящее время недостаточно данных, подтверждающих превосходство какого-либо из методов НЗПТ [53]. При выборе метода следует учитывать: его доступность в стационаре, наличие опыта работы персонала с этой методикой, клинический диагноз и гемодинамический статус пациента, возможность обеспечения сосудистого доступа и достижения целевых значений УФ и клиренса растворенных веществ.

Выбор метода НЗПТ должен также основываться на индивидуальных характеристиках и потребностях пациента. При ОПП или ОПП на фоне хронической болезни почек, синдроме лизиса опухоли предпочтение следует отдавать НВВГД; при сепсисе, тяжелой гипергидратации, полиорганной недостаточности, включая состояния после трансплантации костного мозга, – НВВГФ; при печеночной недостаточности – НВВГФ/НВВГДФ; при врожденных нарушениях метаболизма (гипераммониемии и др.) – НВВГД/НВВГДФ [53].

По результатам опроса специалистов пОИТ в 20 странах Европы установлено, что наиболее часто используемым методом НЗПТ является НВВГДФ (66%) [19].

Преимущества НЗПТ

Метод имитирует естественную функцию почек благодаря непрерывной УФ и клиренсу растворенных веществ и имеет ряд преимуществ перед иГД и ПД при лечении пациентов с ОПП [4]:

- НЗПТ точнее достигает целей клиренса растворенных веществ и УФ, чем ПД. Хотя ПД обеспечивает непрерывное удаление растворенных веществ и УФ, скорость клиренса варьирует и зависит от клинического состояния пациента. НЗПТ позволяет контролировать УФ отдельно от выведения растворенных веществ, что обеспечивает большую гибкость при назначении лечения и невозможно сделать при ПД.
- Поскольку УФ непрерывна и может быть скорректирована в соответствии с потребностями пациента, при НЗПТ обычно нет необходимости в ограничении жидкости, в отличие от пациентов, находящихся на иГД. НЗПТ позволяет вводить все необходимые объемы препаратов крови, лекарственных средств и питательных веществ без ущерба для гидробаланса пациента.
- НЗПТ обеспечивает лучший контроль уремии по сравнению с ПД и иГД.

Сосудистый доступ

К установке и выбору ЦВК-катетеров для НЗПТ применяются те же принципы, что и описанные ранее для иГД (табл. 5).

Оборудование, мембраны и растворы

Аппараты для НЗПТ (рис. 4) в отличие от аппаратов для иГД имеют 4 роликовых насоса: один для забора крови, второй для подачи замещающего раствора (субституата), третий для подачи диализного раствора, четвертый для отведения фильтрата (эффлюента) в дренажный мешок, а также ± 2 насоса для проведения

цитратно-кальциевой антикоагуляции. Для НЗПТ не требуется водоподготовка, поскольку используются фабрично изготовленные растворы, как правило, в пакетах по 5 литров (рис. 4), которые одновременно могут выступать в качестве диализного раствора (НВВГД) и/или замещающего раствора (НВВГДФ/НВВГФ). Отсутствие водоподготовки делает это оборудование мобильным с возможностью проведения процедуры НЗПТ у постели пациента, что очень важно для отделений интенсивной терапии и реанимации.

После обеспечения сосудистого доступа необходимо определиться с типом гемофильтра и набором магистралей для НЗПТ с учетом массы тела ребенка. Площадь поверхности мембраны гемофильтра должна быть максимально приближенной к площади поверхности тела пациента (табл. 8) [53]. Безопасный объем экстракорпорального контура, включающий гемофильтр и магистрали, должен составлять менее 8 мл/кг (<10–20% ОЦК) [54]. Если этот объем превышает 10% ОЦК пациента, то следует рассмотреть предварительное заполнение контура кровью [53, 55, 56]. Согласно опросу специалистов европейских пОИТ показаниями для предварительного заполнения контура кровью (эритроцитарной массой (39% ответов) или разбавлением ее 0,9% р-р NaCl до гематокрита 30–40% (30%), или в/в инфузия эритроцитарной массы до начала НЗПТ (16%)) были следующие: масса тела ребенка <10 кг (56% ответов),

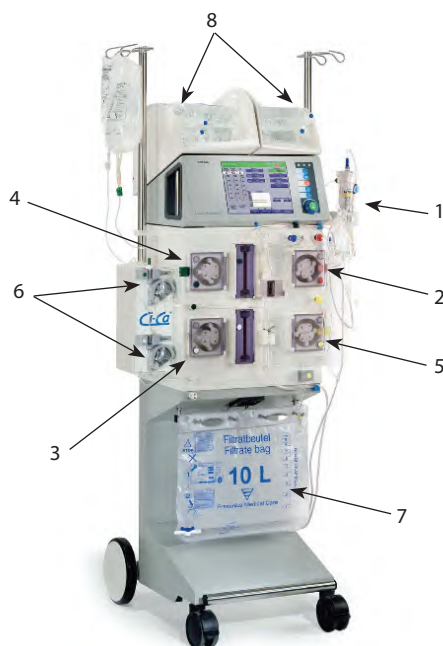


Рис. 4. Аппарат и сопутствующие материалы для проведения непрерывной заместительной почечной терапии: 1 – гемофильтр; 2 – насос кровопроводящей магистрали; 3 – насос замещающей жидкости (субституата); 4 – насос диализата; 5 – насос отведения фильтрата (эффлюента); 6 – насосы цитратно-кальциевой антикоагуляции; 7 – дренажный мешок; 8 – растворы для диализа и замещения

Fig. 4. Machine and related materials for continuous kidney replacement therapy: 1 – hemofilter; 2 – blood pump; 3 – replacement fluid (substitute) pump; 4 – dialysate pump; 5 – effluent/filtrate pump; 6 – citrate-calcium anticoagulation pumps; 7 – drainage bag; 8 – solutions for dialysis and substitution

Таблица 8
Характеристики гемофильтров и объемов заполнения экстракорпорального контура [53]
Table 8

Characteristics of hemofilters and filling volumes of the extracorporeal circuit [53]

Фирма	Масса пациента (кг)	Название гемофильтра	Мембрана	Площадь поверхности мембраны (м ²)	Объем заполнения гемофильтра и магистралей (мл)
Fresenius	3–10	AV Paed	ПС	0,2	72
	10–30	AV 400S	ПС	0,75	135
	>30	AV 600S	ПС	1,4	246
	>30	AV 1000S	ПС	1,8	276
Baxter	8–15	Prismaflex HF20	ПАЭС	0,2	58
	>30	Prismaflex HF1000	ПАЭС	1,15	165
	>30	Prismaflex HF1400	ПАЭС	1,4	186
	15–30	Prismaflex M100	АН69	0,6	93
	>30	Prismaflex HF20	АН69	0,9	153
	>30	Prismaflex M150	АН69	1,5	189
Carpedium	>2,5	HCD 0075	ПС	0,075	27
	>2,5	HCD 015	ПС	0,15	33
	>2,5	HCD 025	ПС	0,25	41

Примечания: ПС – полисульфон; ПАЭС – полиарилэтерсульфон; АН – акрилонитрил.

гемодинамическая нестабильность и использование инотропных препаратов (47%), объем экстракорпорального контура >10% ОЦК ребенка (40%) и анемия (37%) [19]. В других случаях в качестве предварительного заполнения контура чаще применялись 0,9% р-р NaCl (67% ответов) или раствор альбумина (47%) [19].

При выборе растворов для диализа и замещения предпочтение следует отдавать коммерчески приготовленным растворам, которые обычно содержат электролиты и буфер в концентрациях, близких к их уровню в плазме [53]. Так, например, растворы МультиБик 0/2/4 одинаковы по составу: Na⁺ – 140 ммоль/л, Cl⁻ – 109 ммоль/л, Ca²⁺ – 1,5 ммоль/л, HCO₃⁻ – 35 ммоль/л, Mg²⁺ – 0,5 ммоль/л, глюкоза – 5,6 ммоль/л, но различаются по концентрации калия 0/2/4 ммоль/л. Бикарбонат относится к более предпочтительным буферам. В тех случаях, когда запланирована цитратная антикоагуляция, растворы для диализа и замещения не должны содержать кальций [53].

Протокол процедуры НЗПТ (рис. 5)

Скорость кровотока (СК). У пациента на НЗПТ очень важно правильно выбрать СК, чтобы обеспечить адекватный клиренс веществ и УФ. СК определяется на основании массы тела ребенка и обычно остается постоянной независимо от метода НЗПТ: при массе 3–6 кг – 8–12 мл/кг/мин; 6–15 кг – 5–8 мл/кг/мин; 15–30 кг – 4–6 мл/кг/мин; >30 кг – 2–4 мл/кг/мин [53]. В реальной клинической практике часто СК ограничена возможностью катетера и может не соответствовать желаемому и рекомендуемому уровню.

Скорость диализата (СД) при ВВГД или ВВГДФ в большинстве случаев рассчитывается на поверхность или массу тела ребенка: 2000 мл/час/1,73 м² или 20–30 мл/кг/час. Например: если площадь поверхности тела пациента 0,7 м²,

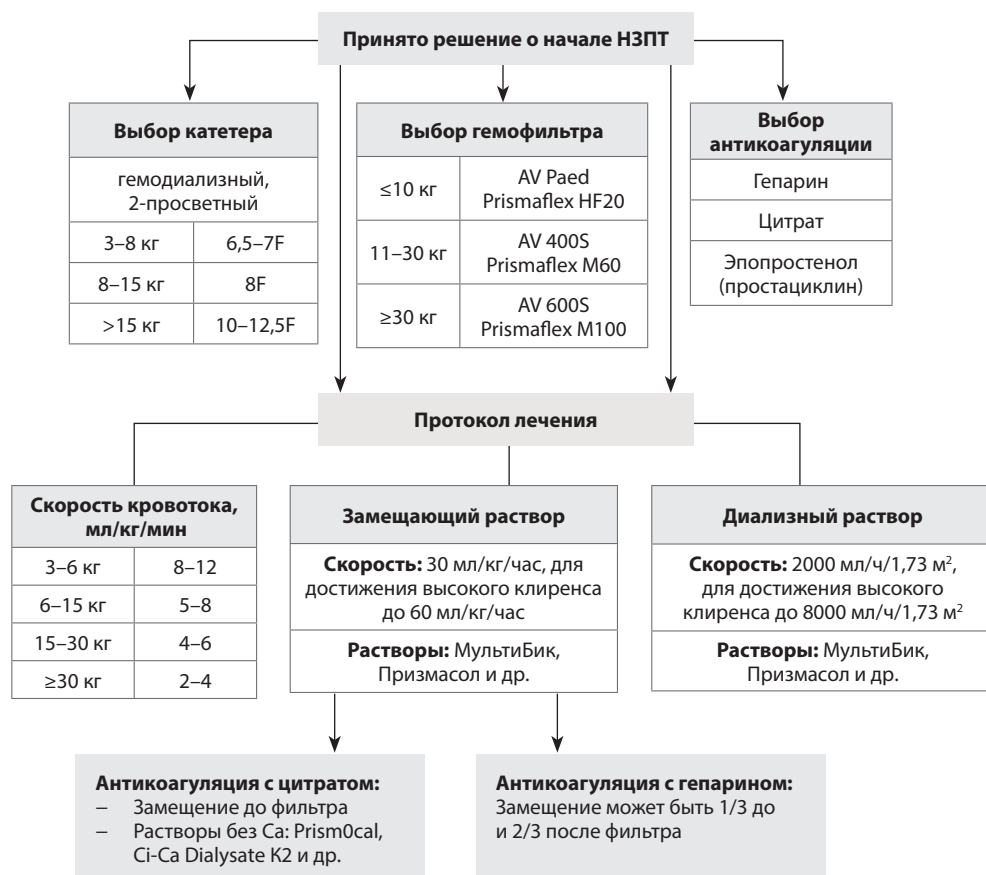


Рис. 5. Схема протокола непрерывной заместительной почечной терапии у детей
Fig. 5. Scheme of continuous kidney replacement therapy protocol in children

то $СД = 2000 \times 0,7 / 1,73 = 809 \text{ мл/час} \approx 800 \text{ мл/ч}$. По мнению ряда экспертов, предпочтение следует отдавать расчету $СД$ на основе массы тела, чтобы избежать завышенных значений $СД$, что особенно важно у детей с массой тела менее 10 килограммов [53].

Скорость ультрафильтрации (СУ). Две важные особенности НЗПТ способствуют высокоэффективному удалению жидкости из организма: 1) использование высокопроницаемых мембран (high-flux); 2) непрерывный и длительный характер процедуры. Количество удаляемой жидкости не безгранично и зависит от таких факторов, как СК, продолжительность лечения, переносимость пациентом процедуры и постепенное снижение эффективности гемофильтра с течением времени. Целевая скорость «чистой» УФ (разность между поступлением (внутри, в/в) и выведением жидкости (заданная на аппарате УФ, диурез, патологические потери, дренажи и т. д.)) должна составлять 1–2 мл/кг/час. Кровь и ее компоненты следует удалять

со скоростью, вдвое превышающей скорость введения. Скорость УФ может быть увеличена у гемодинамически стабильных пациентов, у которых перегрузка жидкостью является основной проблемой [53].

Скорость подачи замещающего раствора обычно составляет 2000 мл/1,73 м²/час и используется при ВВГФ и ВВГДФ. Среднепоточная фильтрация считается при скорости замещения 30 мл/кг/час, а высокопоточная при 40–90 мл/кг/час. Рекомендуется замещение 1/3 рассчитанного объема в префильтрацию (до фильтра) и 2/3 в постфильтрацию (после фильтра). Использование высокопоточной фильтрации сопряжено с тяжелыми электролитными нарушениями, особенно у детей с массой тела менее 10 кг, что требует более частого их контроля в крови [53].

Антикоагуляция. У детей НЗПТ проводится с использованием относительно более низких скоростей кровотока и ЦВК малого диаметра по сравнению со взрослыми, что предрасполагает к тромбообразованию и обуславливает необходимость антикоагуляции. Системная (гепарин) и региональная антикоагуляция (цитрат) наиболее распространены в клинической практике. Стандартная профилактика тромбообразования гепарином включает нагрузочную дозу 10–25 ЕД/кг и поддерживающую 5–10 ЕД/кг/ч [54], которые определяются состоянием гемостаза и могут меняться при проведении процедуры. У детей с геморрагическим синдромом цитратная антикоагуляция является методом выбора. Для ее проведения требуется отдельный центральный венозный доступ для инфузии кальция и артериальная линия для точного забора крови, кроме того, необходимо использование диализата без кальция и частое измерение уровня ионизированного кальция. Относительными противопоказаниями к цитратной антикоагуляции являются: печеночная недостаточность, митохондриальные заболевания и возраст <1 года жизни, поскольку у этой категории пациентов существует риск накопления цитрата. Разрабатываются новые протоколы для использования других регионарных антикоагулянтов, включая простагландин (например, эпопростенол) и ингибиторы сериновых протеиназ (например, нафамостат мезилат), которые показывают многообещающую безопасность и эффективность [4]. Подробно протоколы антикоагуляции при НЗПТ описаны А. Köker с соавт. (2024) [53].

Информация по подготовке к процедуре НЗПТ представлена в виде схематического протокола на рис. 5.

Таким образом, НЗПТ относится к технически сложным методам диализа и считается наиболее подходящим у пациентов с ОПП в критическом состоянии. НЗПТ практически всегда проводится в условиях отделения интенсивной терапии и реанимации.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методики диализного лечения ОПП относятся к жизненно важным и требуют значительных знаний и опыта медицинского персонала. Интермиттирующий гемодиализ является наиболее эффективным для удаления растворенных веществ и жидкости из организма, но, учитывая увеличение числа гемодинамически нестабильных детей в критических состояниях, НЗПТ и ПД являются более приемлемыми. В частности, недавние важные совершенствования мембранных материалов, подходов к антикоагулянтной терапии и миниатюризация аппаратов сделали НЗПТ предпочтительным методом лечения во многих педиатрических центрах.

После внедрения диагностических критериев и классификации KDIGO изучены особенности течения и исходы ОПП в разных детских популяциях. Несмотря на это, остается много нерешенных вопросов, касающихся выбора метода диализа и его оптимальной дозы для достижения наилучших результатов лечения.

По-видимому, своевременная оценка показаний и раннее начало диализа у детей с тяжелым ОПП имеют решающее значение для улучшения исходов и предотвращения дальнейших осложнений.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. De Galasso L., Picca S., Guzzo I. Dialysis modalities for the management of pediatric acute kidney injury. *Pediatr Nephrol.* 2020;35(5):753–765. doi: 10.1007/s00467-019-04213-x
2. Kellum J.A., Lameire N., Aspelin P., et al. KDIGO Clinical Practice Guidelines for Acute Kidney Injury. *Kidney Int. Suppl.* 2012;2(1):1–138. doi: 10.1038/kisup.2012.1
3. Baiko S., Kulakova E. Acute Kidney Injury in Children: Definition, Classification, Epidemiology, Diagnosis (A Literature Review). Part 1. *Pediatrics Eastern Europe.* 2024;12(3):374–395. Available at: <https://doi.org/10.34883/Pl.2024.12.3.001> (in Russian)
4. Muff-Luett M., Devarajan P. *Pediatric acute kidney injury: Indications, timing, and choice of modality for kidney replacement therapy* [Electronic resource]. Available at: <https://www.uptodate.com/contents/pediatric-acute-kidney-injury-indications-timing-and-choice-of-modality-for-kidney-replacement-therapy> (date of accessed 02.06.2025).
5. Baiko S., Kulakova E. Acute Kidney Injury in Children: Prevention, Conservative Treatment and Outcomes (A Literature Review). Part 2. *Pediatrics Eastern Europe.* 2025;13(2):168–185. Available at: <https://doi.org/10.34883/Pl.2025.13.2.001> (in Russian)
6. Sutherland S.M., Byrnes J.J., Kothari M., et al. AKI in hospitalized children: comparing the pRIFLE, AKIN, and KDIGO definitions. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2015;10(4):554–561. doi: 10.2215/CJN.01900214
7. Diaz F., Benfield M., Brown L., Hayes L. Fluid overload and outcomes in critically ill children: A single center prospective cohort study. *J Crit Care.* 2017;39:209–213. doi: 10.1016/j.jcrc.2017.02.023
8. Cortina G., McRae R., Hoq M., et al. Mortality of Critically Ill Children Requiring Continuous Renal Replacement Therapy: Effect of Fluid Overload, Underlying Disease, and Timing of Initiation. *Pediatr Crit Care Med.* 2019;20(4):314–322. doi: 10.1097/PCC.0000000000001806
9. Gist K.M., Selewski D.T., Brinton J., et al. Assessment of the Independent and Synergistic Effects of Fluid Overload and Acute Kidney Injury on Outcomes of Critically Ill Children. *Pediatr Crit Care Med.* 2020;21(2):170–177. doi: 10.1097/PCC.0000000000002107
10. Gorga S.M., Selewski D.T., Goldstein S.L., et al. An update on the role of fluid overload in the prediction of outcome in acute kidney injury. *Pediatr Nephrol.* 2024;39(7):2033–2048. doi: 10.1007/s00467-023-06161-z
11. Lintz V.C., Vieira R.A., Carioca F.L., et al. Fluid accumulation in critically ill children: a systematic review and meta-analysis. *EClinicalMedicine.* 2024;74:102714. doi: 10.1016/j.eclinm.2024.102714
12. Ronco C., Bellomo R., Homel P., et al. Effects of different doses in continuous veno-venous haemofiltration on outcomes of acute renal failure: a prospective randomised trial. *Lancet.* 2000;356(9223):26–30. doi: 10.1016/S0140-6736(00)02430-2
13. Gist K.M., Menon S., Anton-Martin P., et al. Time to Continuous Renal Replacement Therapy Initiation and 90-Day Major Adverse Kidney Events in Children and Young Adults. *JAMA Netw Open.* 2024;7(1):e2349871. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.49871
14. KDIGO Clinical Practice Guideline for Acute Kidney Injury. *Nephrology and Dialysis.* 2014;16(4):1–155. (in Russian)
15. Rees L., Bockenbauer D., Webb N., Punaro M. (eds) *Paediatric Nephrology, 3rd Ed.* Oxford University Press: Oxford, UK, 2019.
16. Baiko S., Kulakova E., Aksenova M., et al. Determination of glomerular filtration rate in children and adolescents: theoretical and practical aspects. *Nephrology and Dialysis.* 2024;26(2):186–203. (in Russian). Available at: <https://doi.org/10.28996/2618-9801-2024-2-186-203>
17. Davis A.L., Carcillo J.A., Aneja R.K., et al. American College of Critical Care Medicine Clinical Practice Parameters for Hemodynamic Support of Pediatric and Neonatal Septic Shock [published correction appears in *Crit Care Med.* 2017;45(9):e993. doi: 10.1097/CCM.0000000000002573. Kisson, Niranjana Tex [corrected to Kisson, Niranjana]; Weingarten-Abrams, Jacki [corrected to Weingarten-Arams, Jacki]]. *Crit Care Med.* 2017;45(6):1061–1093. doi: 10.1097/CCM.0000000000002425
18. Gaudry S., Hajage D., Benichou N., et al. Delayed versus early initiation of renal replacement therapy for severe acute kidney injury: a systematic review and individual patient data meta-analysis of randomised clinical trials. *Lancet.* 2020;395(10235):1506–1515. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30531-6
19. Daverio M., Cortina G., Jones A., et al. Continuous Kidney Replacement Therapy Practices in Pediatric Intensive Care Units Across Europe. *JAMA Netw Open.* 2022;5(12):e2246901. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2022.46901
20. Cortina G., Daverio M., Demirkol D., et al. Continuous renal replacement therapy in neonates and children: what does the pediatrician need to know? An overview from the Critical Care Nephrology Section of the European Society of Paediatric and Neonatal Intensive Care (ESPNIC). *Eur J Pediatr.* 2024;183(2):529–541. doi: 10.1007/s00431-023-05318-0
21. Starr M.C., Charlton J.R., Guillet R., et al. Advances in Neonatal Acute Kidney Injury. *Pediatrics.* 2021;148(5):e2021051220. doi: 10.1542/peds.2021-051220
22. Munshi R., Lee-Son K., Hackbarth R.M., et al. Clinical evaluation of the Prismaflex™ HF 20 set and Prismaflex™ system 7.10 for acute continuous kidney replacement therapy (CKRT) in children. *Pediatr Nephrol.* 2020;35(12):2345–2352. doi: 10.1007/s00467-020-04664-7
23. Garzotto F., Vidal E., Ricci Z., et al. Continuous kidney replacement therapy in critically ill neonates and infants: a retrospective analysis of clinical results with a dedicated device. *Pediatr Nephrol.* 2020;35(9):1699–1705. doi: 10.1007/s00467-020-04562-y
24. Walters S., Porter C., Brophy P.D. Dialysis and pediatric acute kidney injury: choice of renal support modality. *Pediatr Nephrol.* 2009;24(1):37–48. doi: 10.1007/s00467-008-0826-x
25. Ponce D., Gobo-Oliveira M., Balbi A.L. Peritoneal Dialysis Treatment Modality Option in Acute Kidney Injury. *Blood Purif.* 2017;43(1–3):173–178. doi: 10.1159/000452703

26. Guzzo I, de Galasso L, Mir S., et al. Acute dialysis in children: results of a European survey. *J Nephrol.* 2019;32(3):445–451. doi: 10.1007/s40620-019-00606-1
27. Chionh C.Y., Soni S.S., Finkelstein F.O., et al. Use of peritoneal dialysis in AKI: a systematic review. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2013;8(10):1649–1660. doi: 10.2215/CJN.01540213
28. Nourse P, Cullis B, Finkelstein F., et al. ISPD guidelines for peritoneal dialysis in acute kidney injury: 2020 Update (paediatrics). *Perit Dial Int.* 2021;41(2):139–157. doi: 10.1177/0896860820982120
29. Stack M., Price N., Ronaldson J., et al. Laparoscopic versus open peritoneal dialysis catheter insertion for the management of pediatric acute kidney injury. *Pediatr Nephrol.* 2016;31(2):297–303. doi: 10.1007/s00467-015-3221-4
30. Watson A.R., Gartland C.; European Paediatric Peritoneal Dialysis Working Group. Guidelines by an Ad Hoc European Committee for Elective Chronic Peritoneal Dialysis in Pediatric Patients. *Perit Dial Int.* 2001;21(3):240–244.
31. Crabtree J.H., Shrestha B.M., Chow K.M., et al. Creating and Maintaining Optimal Peritoneal Dialysis Access in the Adult Patient: 2019 Update. *Perit Dial Int.* 2019;39(5):414–436. doi: 10.3747/pdi.2018.00232
32. Auron A., Warady B.A., Simon S., et al. Use of the multipurpose drainage catheter for the provision of acute peritoneal dialysis in infants and children. *Am J Kidney Dis.* 2007;49(5):650–655. doi: 10.1053/j.ajkd.2007.02.274
33. Warady B.A., Bakkaloglu S., Newland J., et al. Consensus guidelines for the prevention and treatment of catheter-related infections and peritonitis in pediatric patients receiving peritoneal dialysis: 2012 update. *Perit Dial Int.* 2012;32 Suppl 2 (Suppl 2):32–86. doi: 10.3747/pdi.2011.00091
34. Esezobor C.I., Ladapo T.A., Lesi F.E. Peritoneal dialysis for children with acute kidney injury in Lagos, Nigeria: experience with adaptations. *Perit Dial Int.* 2014;34(5):534–538. doi: 10.3747/pdi.2013.00097
35. Abdelraheem M., Ali el-T., Osman R., et al. Outcome of acute kidney injury in Sudanese children – an experience from a sub-Saharan African unit. *Perit Dial Int.* 2014;34(5):526–533. doi: 10.3747/pdi.2013.00082
36. Cullis B., Abdelraheem M., Abrahams G., et al. Peritoneal dialysis for acute kidney injury. *Perit Dial Int.* 2014;34(5):494–517. doi: 10.3747/pdi.2013.00222
37. Vasudevan A., Phadke K., Yap H.K. Peritoneal dialysis for the management of pediatric patients with acute kidney injury. *Pediatr Nephrol.* 2017;32(7):1145–1156. doi: 10.1007/s00467-016-3482-6
38. Burgmaier K., Hackl A., Ehren R., et al. Peritoneal dialysis in extremely and very low-birth-weight infants. *Perit Dial Int.* 2020;40(2):233–236. doi: 10.1177/0896860819887292
39. Makulova A., Rekhviashvili M., Spiridonova N., et al. Experience in continuous peritoneal lavage in the extremely low body weight infant. *Neonatology: News, Opinions, Training.* 2019;7(3):40–5. doi: 10.24411/2308-2402-2019-13005 (in Russian)
40. Makulova A., Zolotareva L., Aborin S., et al. Acute kidney injury in newborns treated in intensive care units: results of a multicenter study. *Neonatology: News, Opinions, Training.* 2021;9(1):8–23. doi: https://doi.org/10.33029/2308-2402-2021-9-1-8-23 (in Russian)
41. Garzotto F., Zaccaria M., Vidal E., et al. Choice of Catheter Size for Infants in Continuous Renal Replacement Therapy: Bigger Is Not Always Better. *Pediatr Crit Care Med.* 2019;20(3):e170–e179. doi: 10.1097/PCC.0000000000001825
42. Ma G.M.Y., Ventura L.M., Amiribadi A., et al. Hemodialysis Catheters in Infants: A Retrospective Single-Center Cohort Study. *J Vasc Interv Radiol.* 2020;31(5):778–786. doi: 10.1016/j.jvir.2020.01.020
43. Hackbarth R., Bunchman T.E., Chua A.N., et al. The effect of vascular access location and size on circuit survival in pediatric continuous renal replacement therapy: a report from the PPCRRT registry. *Int J Artif Organs.* 2007;30(12):1116–1121. doi: 10.1177/039139880703001212
44. *Work book «All about hemodialysis»* [Electronic resource]. Available at: <https://theipna.org/wp-content/uploads/2024/08/PEDIATRIC-NEPHROLOGY-A-SYMPOSIUM-on-CHRONIC-KIDNEY-DISEASE.pdf> (date of accessed 31.07.2025).
45. *Childrens health Ireland nursing practice guideline on haemodialysis* [Electronic resource]. Available at: https://media.childrenshealthireland.ie/documents/CHI_NPG_Haemodialysis_Guideline.pdf (date of accessed 31.07.2025).
46. *Online calculator of body surface area for children using Dubois' formula* [Electronic resource]. Available at: <https://www.merckmanuals.com/medical-calculators/BodySurfaceArea-ru.htm> (date of accessed 31.07.2025).
47. *Online calculator of body surface area for children using Mosteller's formula* [Electronic resource]. Available at: <http://allcalc.ru/node/257> (date of accessed 31.07.2025).
48. Marshall M.R., Golper T.A. Low-efficiency acute renal replacement therapy: role in acute kidney injury. *Semin Dial.* 2011;24(2):142–148. doi: 10.1111/j.1525-139X.2011.00829.x
49. Strazdins V., Watson A.R., Harvey B.; European Pediatric Peritoneal Dialysis Working Group. Renal replacement therapy for acute renal failure in children: European guidelines. *Pediatr Nephrol.* 2004;19(2):199–207. doi: 10.1007/s00467-003-1342-7
50. Raina R., Vijayaraghavan P., Kapur G., et al. Hemodialysis in neonates and infants: A systematic review. *Semin Dial.* 2018;31(3):289–299. doi: 10.1111/sdi.12657
51. Pollack S., Eisenstein I., Tarabeih M., et al. Long-term hemodialysis therapy in neonates and infants with end-stage renal disease: a 16-year experience and outcome. *Pediatr Nephrol.* 2016;31(2):305–313. doi: 10.1007/s00467-015-3214-3
52. Fischbach M., Edefonti A., Schröder C., Watson A.; European Pediatric Dialysis Working Group. Hemodialysis in children: general practical guidelines. *Pediatr Nephrol.* 2005;20(8):1054–1066. doi: 10.1007/s00467-005-1876-y
53. Köker A., Yaman A., Akkuzu E., et al. Continuous Renal Replacement Therapy (CRRT) Protocol in Critically Ill Children. *J Pediatr Emerg Intensive Care Med.* 2024;11(1):29–56. doi: 10.4274/cayd.galenos.2023.71677
54. Cho M.H., Kang H.G. Acute kidney injury and continuous renal replacement therapy in children; what pediatricians need to know. *Korean J Pediatr.* 2018;61(11):339–347. doi: 10.3345/kjp.2018.06996
55. Pasko D.A., Mottes T.A., Mueller B.A. Pre dialysis of blood prime in continuous hemodialysis normalizes pH and electrolytes. *Pediatr Nephrol.* 2003;18(11):1177–83. doi: 10.1007/s00467-003-1258-2
56. Saito D., Fujimaru T., Inoue Y., et al. Serial measurement of electrolyte and citrate concentrations in blood-primed continuous hemodialysis circuits during closed-circuit dialysis. *Pediatr Nephrol.* 2020;35(1):127–133. doi: 10.1007/s00467-019-04318-3