

# НАНО- И МИКРОЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ.

## Часть III. Феррочастицы в составе магнитоуправляемых сорбентов

В.Н. Варюхин, П.К. Хиженков, В.В. Сироткин, В.П. Хиженков

*Донецкий физико-технический институт Национальной академии наук Украины,  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина, [wiasdir@gmail.com](mailto:wiasdir@gmail.com)*

Исследованы сорбционные характеристики магнитоластовых гранул, состоящих из мелкодисперсных частиц железа и магнитотвердых ферритов в поливиниловом спирте. Показана возможность управления временными характеристиками процессов сорбции и десорбции с помощью магнитных полей. Поле с переменным направлением градиента напряженности уменьшает временные характеристики процессов сорбции-десорбции в 7–10 раз, а действие постоянного поля увеличивает это время в 1,3–2,5 раза. Показано также, что использование сорбентов в составе магнитотвердых гранул в технике лечения гнойных ран на основе метода магнитооживления в переменных полях увеличивает эффективность лечения в ~ 9 раз.

УДК 537.84

### ВВЕДЕНИЕ

Очистка жидкостей от растворенных примесей является распространенной задачей, часто возникающей или постоянно имеющей место в различных областях человеческой деятельности. Решение подобного рода задач осуществляется с помощью сорбционных фильтров (активированный уголь, молекулярные сита, ионообменные смолы и т.д.). Для эффективной работы таких фильтров необходимо выполнение ряда обязательных условий: максимально большая площадь контакта сорбента с очищаемой жидкостью; обеспечение оттока очищенных объемов жидкости и притока новых ее объемов. Оба эти условия относительно легко достигаются в технике и химии путем оптимизации размеров гранул сорбентов, их общего объема и скорости прохождения через них очищаемой жидкости. Эффективность работы сорбционных фильтров можно увеличить путем перемешивания сорбирующих гранул или перевода их во взвешенное, псевдооживленное состояние. Максимальная оптимизация параметров по указанным характеристикам возможна лишь при работе с простыми растворами. В тех случаях, когда от растворенных примесей необходимо очищать жидкую основу коллоидных растворов, не нарушая при этом целостности коллоида, возникают трудности, связанные с минимизацией размеров гранул сорбентов: они должны быть существенно больших размеров, чем размеры коллоидных частиц очищаемого раствора, что в свою очередь приводит к уменьшению поверхности взаимодействия и к уменьшению эффективности процесса. Компенсировать подобное уменьшение эффективности процесса сорбции путем механического перемешивания сорбента в ряде случаев не представляется возможным, например в технике гемосорбции, где коллоидными частицами являются форменные элементы крови, обладающие весьма малой механической прочностью. Возникающие в этих случаях нежелательные ограничения можно преодолеть путем использования в процессе сорбции эффекта магнитооживления в магнитном поле с переменным направлением градиента напряженности [1, 2]. При этом в состав сорбента необходимо ввести нано- или микроразмерные частицы железа или другие ферромагнитные материалы, а сами гранулы могут иметь размеры равные или даже меньшие, чем размеры коллоидных частиц очищаемых растворов (для случая гемосорбции эти размеры могут быть меньше или равны 1–5 мкм). Цель настоящей работы – экспериментальное подтверждение увеличения эффективности процессов сорбции в условиях фиксации или перемешивания сорбента магнитными полями.

### ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ КОЛЛОИДОВ ЧЕРЕЗ МАГНИТООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ

Экспериментально исследовали способность магнитооживленного слоя беспрепятственно пропускать коллоидные растворы при следующих соотношениях размеров частиц сорбента ( $\chi_c$ ) и частиц коллоидов ( $\chi_k$ ):  $\chi_c > \chi_k$ ;  $\chi_c = \chi_k$ ;  $\chi_c < \chi_k$ . Частицы железа, имитирующие сорбент, помещали

в прозрачную стеклянную трубку, снабженную жестким пористым фильтром. Диаметр стеклянной трубки – 5 мм, толщина слоя насыпного фильтра – 30 мм. Размеры частиц железа в первой пробирке ~ 100–200 мкм, во второй – 10–20 мкм и в третьей – 0,1–0,5 мкм. В роли очищаемого коллоида использовали стабилизированную взвесь полиакриловых сфер диаметром 5–20 мкм. Коллоид наливали в верхнюю часть трубки на поверхность слоя частиц железа из емкости объемом 50 мл. Объемная концентрация коллоида составляла ~ 5%, а процесс фильтрации протекал под действием силы тяжести. Результаты оценивали визуально. В первом случае, когда частицы коллоида во много раз меньше частиц железа, взвешенные частицы свободно проходят сквозь насыпной фильтр и скапливаются вблизи поверхности жесткого фильтра, пропускающего только воду. В двух других случаях коллоидные частицы оседают на поверхности насыпного фильтра, и далее проходит только вода. Примерно такая же картина наблюдается, когда насыпные частицы удерживаются с помощью постоянного магнитного поля, а поддерживающие жесткие фильтры отсутствуют. Отличие состоит лишь в том, что взвешенные частицы, свободно пройдя сквозь слой более крупных частиц железа, уносятся и далее с потоком воды. В случае же равных или более мелких частиц железа взвешенные немагнитные частицы задерживаются на поверхности магнитной пробки, сквозь которую проходит только вода. Следует отметить, что скорость прохождения воды уменьшается пропорционально уменьшению размеров частиц насыпного фильтра. Наблюдаемая картина приобретает качественно другой характер, если частицы железа удерживать не жестким опорным фильтром или постоянным магнитным полем, а магнитным полем с переменным направлением градиента напряженности, когда частицы находятся в подвижном состоянии и одновременно удерживаются в зоне действия поля. В этом эксперименте во всех случаях немагнитные коллоидные частицы свободно проходят сквозь слои частиц железа, а размеры частиц железа на скорость прохождения коллоида практически не влияют. Из результатов приведенных экспериментов видим, что размеры частиц насыпных (сорбционных) фильтров можно уменьшить, если придать им свойства ферромагнетиков, а для перемешивания использовать эффект магнитооживления в поле с переменным направлением градиента напряженности, то есть сорбционный эффект будет возрастать за счет как увеличения поверхностей взаимодействия, так и магнитомеханического перемешивания. Все вышесказанное относится как к адсорбционным, так и к абсорбционным фильтрам.

#### СПЕЦИФИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ФЕРРОСОРБЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Магнитное перемешивание, как было отмечено в предыдущем разделе, должно способствовать ускорению сорбционных процессов (адсорбции и абсорбции). Для подтверждения данного предположения был проведен ряд модельных экспериментов. В качестве абсорбирующего материала использовали поливиниловый спирт (ПВС) в комплексе с частицами металлического железа. Объемное соотношение исходного сухого порошкового ПВС и частиц железа подбирали эмпирическим путем, исходя из необходимости оптимального сочетания в конечном материале магнитных и сорбционных характеристик, обеспечивающих максимальную специфическую активность конечного продукта. Соотношение Fe : ПВС составило 1:3. Порошок ПВС растворяли в кипящей дистиллированной воде, к полученному раствору добавляли порошковое железо и тщательно диспергировали. Затем экструзионным методом формировали гранулы размером до 0,5 мм. Абсорбционные свойства гранул оценивали по времени набухания и поглощения ионов в растворах  $\text{CuSO}_4$ . Вода и растворенные в ней ионы проникают в процессе набухания внутрь гранул и достигают поверхности частиц железа. Далее, в результате реакции вытеснения железо переходит в ионную форму, а гранулы перестают реагировать на магнитное поле, что свидетельствует об окончании процесса абсорбции растворенных ионов. Время от начала контакта гранул сорбента до утраты ими магнитных свойств принято для оценки эффективности процесса в зависимости от концентрации сорбата, температурного режима, размеров гранул и характера перемешивания. Время от момента начала контакта раствора с гранулами до утраты последними способности отклика на внешнее магнитное поле практически соответствует времени абсорбции ионов меди поливиниловым спиртом и в дальнейшем использовалось в оценках специфической активности исследуемого процесса. На рис. 1 приведены зависимости времени абсорбции  $t$  от концентрации сорбата  $C$  ( $\text{CuSO}_4$ ) при различных условиях покоя и перемешивания реагирующей системы. Из полученных зависимостей следует, что при фиксированной температуре ( $18^\circ\text{C}$ ) время сорбции обратно пропорционально концентрации сорбата. Время  $t$  имеет максимальное значение в условиях действия постоянного магнитного поля (кривая 1), что является результатом образования плотных кластеров за счет магнитного взаимодействия между гранулами, что затрудняет свободное про-

никновение внутрь кластеров ионов сорбата. Исключение действия постоянного магнитного поля уменьшает время  $t$  (кривая 2), которое становится еще меньше при механическом перемешивании гранул в растворе (кривая 3) и достигает минимума при перемешивании с помощью внешнего магнитного поля с переменным направлением градиента напряженности  $H_{\Delta\Delta}$  (кривая 4). Перемешивание в  $H_{\Delta\Delta}$  наиболее эффективно, так как в этом случае не происходит увлечения гранул потоком раствора, что способствует увеличению эффективности контакта поверхностей гранул с сорбируемыми ионами. С ростом температуры, при прочих равных условиях, время  $t$  монотонно уменьшается (скорость абсорбции возрастает) и при достижении максимально допустимых температур (в нашем случае это немногим менее  $100^{\circ}\text{C}$ ) стремится к нулю. Время  $t$  соответствует времени полного вымывания металлического железа из всех гранул, однако в ходе экспериментов было отмечено, что первыми реагируют на магнитное поле наиболее мелкие гранулы ( $\sim 0,1$  мм), а самые крупные ( $\sim 0,5$  мм) – последними, то есть интенсивность процесса тем выше, чем меньшие размеры имеют гранулы, что обусловлено соотношением общей площади поверхности сорбента и необходимой глубины проникновения сорбируемого вещества. Таким образом, результаты экспериментов дают основания предположить, что наиболее эффективным рабочим телом в реальных гемосорбирующих технических устройствах будут микрокапсулы, состоящие из одной или нескольких частиц железа, покрытых оболочкой, выполненной из абсорбирующего материала. В этой технологии наиболее оптимальными будут размеры микрокапсул, не превышающие размеры форменных элементов крови (5–10 мкм). Кроме процесса абсорбции приведенные эксперименты характеризуют также и обратный процесс – десорбции. Возникающие в результате реакции вытеснения ионы железа выходят из гранул в окружающий раствор. Процессы сорбции меди и десорбции железа идут одновременно – голубой цвет окружающего гранулы раствора меняется на зеленый. Скорость процесса десорбции зависит от режима покоя или перемешивания, а также всех других параметров системы, описанных выше и приведенных на рис. 1.

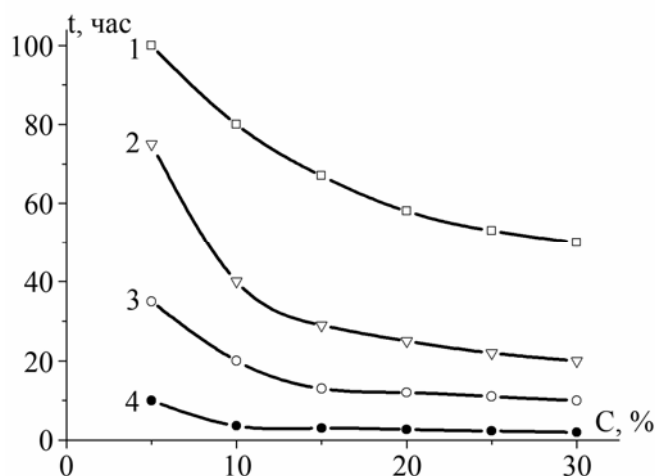


Рис. 1. Зависимость времени  $t$  абсорбции от концентрации  $C$  сорбата (пояснение в тексте)

Наблюдаемый в эксперименте эффект может найти интересное применение в медицинской практике. Если железосодержащие микрогранулы сорбента предварительно насытить водорастворимым лекарственным препаратом, то последний при введении инъекционным методом в нужный участок организма можно будет не только локализовать и удерживать с помощью действующих извне магнитных полей, но и управлять скоростью его выделения из объема гранул в окружающие ткани. Все вышесказанное легко подтвердить простыми качественными экспериментами. В исследованиях использовали сферические микрогранулы диаметром 50–150 мкм, состоящие из поливинилового спирта и содержащие в своем объеме наноразмерные (10–100 нм) частицы железа и хлорид натрия при следующем соотношении (в весовых частях): ПВС – 4, Fe – 5, NaCl – 1. В три пробирки наливали по 10 мл дистиллированной  $\text{H}_2\text{O}$  и с помощью микроамперметра оценивали ее электропроводность при подаче на погруженные медные электроды (диаметр – 0,4 мм, длина – 5 мм, расстояние между электродами 4 мм) постоянного электрического тока напряжением 4,5 В. Во всех трех пробирках получили одинаковые значения тока  $I_0 = 0,105$  мА. Затем в пробирки вносили навески исследуемых микрогранул по 1,0 г в каждую. Изменение концентрации соли в воде фиксировали по показаниям микроамперметра через определенные промежутки времени. При полном растворении и выходе NaCl

из гранул ток при данном весовом соотношении соли и воды (1:100) был определен заранее и составил величину  $I_{max} \sim 32$  мА. На рис. 2 показаны зависимости времени полного выхода соли из гранул во внешнюю среду в условиях отсутствия внешних воздействий (кривая 1), действия постоянного магнитного поля (кривая 2) и магнитного поля с переменным направлением градиента напряженности (кривая 3). Из результатов экспериментов видно, что действие постоянного магнитного поля приводит к увеличению времени достижения раствором значения  $I_{max}$  на 60 мин: с 90 мин при отсутствии внешних воздействий (кривая 1) до 150 мин (кривая 2). Эффект замедления, как и в эксперименте с медным купоросом, вызван образованием плотных гранулярных кластеров, затрудняющих выход ионов из гранул. Действие магнитного поля с переменным градиентом приводит к интенсивному перемешиванию гранул в зоне действия поля и вызывает обратный эффект – значительное (на 80 мин) уменьшение времени насыщения воды ионами. В сумме разница во времени (или скорости) достигает  $\sim 140$  мин.

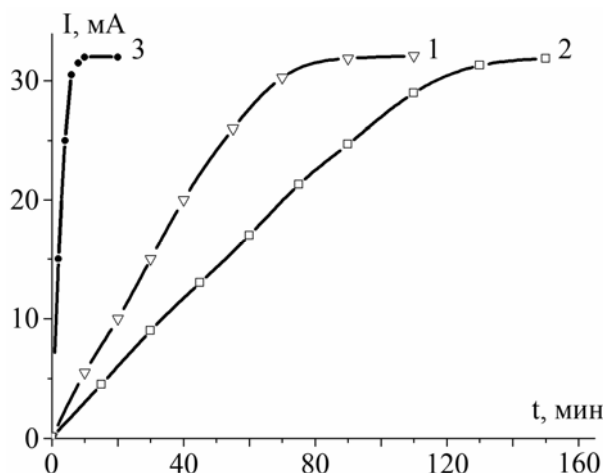


Рис. 2. Зависимость времени выхода соли из гранул во внешнюю среду в условиях отсутствия (1) и наличия (2;3) внешних полевых воздействий (пояснения в тексте)

При этом качественные закономерности десорбции, связанные с концентрациями, температурными режимами и характером перемешивания, практически не отличаются от закономерностей, свойственных абсорбционному процессу. В отличие от предыдущего случая здесь предполагается использование магнитоуправляемых сорбентов непосредственно в тканях организма. Поскольку конечной целью является полное высвобождение предварительно введенного в объем сорбента лекарственного вещества, следует предположить, что конечным этапом этого процесса будут растворение или распад сорбента и разрушение гранул. На этом этапе исчезает необходимость в использовании удерживающих внешних магнитных полей. В то же время удалить введенные в состав сорбента частицы железа не представляется возможным. Их можно либо удерживать на месте с помощью поля постоянного магнита, либо дать возможность медленно рассеиваться с током крови или других тканевых жидкостей. В этом случае в качестве феррофазы в составе микрогранул использование микрометровых частиц железа недопустимо по причине их больших размеров и риска образования тромбов в капиллярных сетях других органов и тканей. Для решения такого рода задач подходят лишь наноразмерные частицы ( $\leq 10^3$  нм), а гранулы должны иметь размеры, не препятствующие свободному введению их в организм инъекционным методом. В предлагаемой технологии можно использовать наноразмерные частицы магнетита или других биосовместимых ферроматериалов. Основным результатом проведенного эксперимента является установление факта, что сорбционные процессы (как абсорбция, так и десорбция) при прочих равных условиях наиболее эффективно идут в режиме перемешивания с участием магнитного поля с переменным направлением градиента напряженности. Высокая степень эффективности обеспечивается тем, что механическим источником перемешивания служат гранулы сорбента. Применение каких-либо других механических способов перемешивания приводит к совместному перемещению гранул и жидкости, в которой они находятся, что в свою очередь замедляет скорость доставки новых порций сорбируемого вещества к поверхности сорбента (при абсорбции) или скорость удаления с поверхности сорбента освобождаемых им веществ (при десорбции). Самопроизвольную диффузионную скорость как сорбции, так и десорбции можно либо замедлить с помощью постоянных магнитных полей, либо ускорить с помощью магнитных полей с переменным направлением градиента напряженности. При этом во всех случаях сорбционный материал будет удерживаться в межполюсном пространстве.

## МАГНИТОТВЕРДЫЕ ФЕРРИТЫ И СОРБЕНТЫ В ТЕХНИКЕ ЛЕЧЕНИЯ ГНОЙНЫХ РАН

При решении определенных технических задач применение магнитооживленных систем, как показывает опыт, является наиболее эффективным [3–7]. Некоторые из этих задач, например очистка поверхностей, имеют свои аналоги в медицине. Однако если в технике проблема очистки различных поверхностей (керамических плат интегральных схем, изделий из металла, пластмассы, дерева) давно и успешно решена [6], то в медицине дело обстоит иначе, и способы очистки, например гнойных ран [8–9], в настоящее время весьма далеки от совершенства. Остановимся на этом вопросе более подробно. Согласно [9] очистку гнойной раны производят пульсирующей струей жидкости с антисептиком, которую подают под давлением 2–3 атм с частотой пульсации от 100 до 1000 в минуту. При этом рана неудовлетворительно очищается от разрушенных клеток, так как струя жидкости увлекает лишь те некротизированные клетки и микроорганизмы, которые рыхло связаны с поверхностью раны. Струя жидкости, подаваемая в одном направлении, практически не промывает микрокарманы, часто имеющиеся в ранах. Согласно работе [9] очистка раны пульсирующей струей жидкости, без ее хирургической обработки, обеспечивает незначительное снижение количества микроорганизмов в ней, а хирургическая обработка, сама по себе способствующая очищению, приводит к дополнительному травмированию тканей и, таким образом, нарушает естественный ход заживления. Кроме того, очистка занимает много времени – обычно несколько часов.

В последнее время формируется другой подход к решению проблемы. В работе [10] приводятся результаты экспериментального лечения гнойных ран с помощью магнитокерамических сфер, на которые кратковременно воздействуют переменным магнитным полем напряженностью 100 Э и частотой 20 Гц. Отмечается высокая эффективность предложенного метода. Однако из публикации [10] не ясно, за счет чего достигается положительный эффект: внешнего магнитного поля, собственного поля магнитокерамических сфер или антибиотиков, насыщающих эти сферы. Отсутствуют также данные о наличии положительного эффекта от применения способа в сравнении с уже используемыми методами (например, [9]), так как орошение раны 10% раствором хлорида натрия (контрольный опыт в работе [10]) даже с большой натяжкой трудно считать лечением. В [11] приведены результаты лечения 76 больных с гнойными ранами и трофическими язвами с помощью магнитных жидкостей. Однако метод [11] включает в процесс лечения и оперативное вмешательство.

В работе [12] приведены результаты экспериментальных исследований метода лечения гнойных ран, основанного на эффекте магнитооживления в переменном магнитном поле. Его высокая эффективность достигалась путем механического воздействия на раневую поверхность магнитопластовых гранул, в которых связующим феррочастицы материалом служил полистирол. Эффективность данного метода по сравнению с контролем увеличивалась в ~ 10 раз.

В настоящем разделе показана возможность увеличения эффективности использования магнитооживленного слоя как инструмента для очистки гнойных ран. Эксперименты проводились на белых крысах, кроликах и собаках по следующей методике. У животного в области бедра сбрасывали шерсть и под местной анестезией наносили рану путем иссечения кожного лоскута размером 2 x 2 см. На раневой поверхности в течение часа экспонировали марлевую салфетку, равную по величине размеру раны и смоченную раствором хлорида кальция. Затем салфетку заменяли другой, пропитанной культурой *Staf. aureus* ( $2 \cdot 10^9$  микробных клеток в 5 мл физиологического раствора). Через двое суток рана становилась гнойной. Количество микроорганизмов в ней определяли после промывки физиологическим раствором путем подсчета в иссеченном кусочке ткани по методу [13]. В пересчете на 1 г ткани количество микробов в наших экспериментах составляло  $(5,8-6,7) \cdot 10^7$ . Далее в рану вводили намагниченные гранулы из расчета 500 мг на 1 см<sup>3</sup> раневой полости, рана заполнялась физиологическим раствором и герметизировалась путем прижатия к окружающим ее здоровым тканям пластмассового колпака с резиновым бортиком. Над колпаком размещали электромагнит, при включении которого в сеть переменного тока частицы переходили в магнитооживленное состояние и интенсивно воздействовали на раневую поверхность, механически очищая ее от погибших клеток и микроорганизмов. Очищающее воздействие при этом оказывал и физиологический раствор, так как возникающие в нем при движении гранул вихревые потоки способствовали вымыванию гноя из микрокарманов. Процедуру проводили в течение 5 мин. Затем электромагнит переключали в режим постоянного тока с целью удаления из раны магнитных гранул. Далее колпак снимали, полость раны промывали стерильным физиологическим раствором и определяли количество микроорганизмов.

В проведенных экспериментах исследовалась зависимость эффективности очистки раны от материала частиц, их размеров, напряженности (амплитуды) переменного магнитного поля и времени воздействия. В контрольных экспериментах очистка ран проводилась по методу [12].

В проведенных экспериментах в отличие от [12] феррофазой служили частицы магнитотвердого феррита бария размером 10–100 мкм, связующим материалом – поливиниловый спирт.

Приведенные ниже экспериментальные результаты получены с использованием гранул, имеющих объемную концентрацию феррофазы 60–65%, предварительно намагниченных во внешнем поле  $H = 20$  кЭ. Выбор частоты переменного магнитного поля  $f = 50$  Гц обусловлен результатами, полученными в работе [14], а также необходимостью достижения максимальной технической простоты применяемого оборудования. Оптимизация параметров процесса очистки проводилась по трем основным показателям – амплитуде переменного магнитного поля  $H_A$ , размеру гранул  $D$  и времени воздействия  $t$ . Критерием очистки являлось остаточное количество микроорганизмов  $n$  в 1 г раневой ткани.

Зависимости  $n(H_A)$ ,  $n(D)$  и  $n(t)$  приведены на рис. 3. Как видно из графиков, эффективность очистки с ростом амплитуды  $H_A$  и времени воздействия достигает определенного предела, а зависимость  $n(D)$  имеет минимум, обусловленный, с одной стороны, резким уменьшением энергии взаимодействия гранул со стенками раны при  $D < 1,0$  мм, а с другой – уменьшением поверхности взаимодействия при росте  $D$ . В результате очистки гнойных ран в эксперименте при оптимальном соотношении  $H_A$ ,  $D$  и  $t$  число  $n$  доходило до  $(6-7) \cdot 10^2$ , что почти на порядок превышает лучшие результаты, получаемые при использовании метода [12],  $n = (5,4-6,6) \cdot 10^3$ .

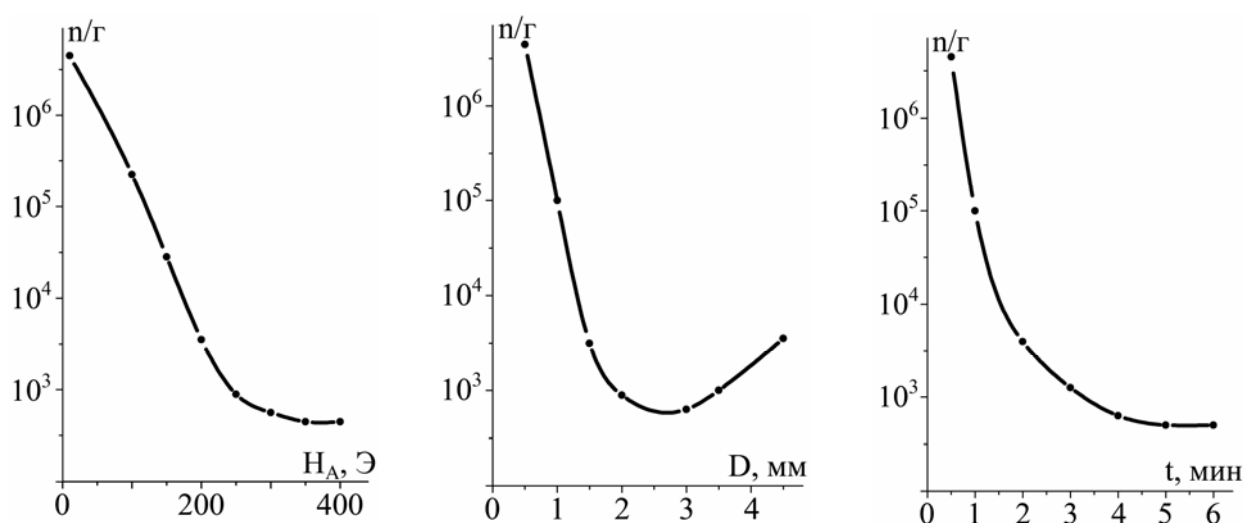


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки гнойной раны  $n/g$  от амплитуды поля  $H_A$ , диаметра гранул  $D$  и времени воздействия  $t$

Как видно из результатов экспериментов, с помощью магнитооживленного слоя очистка гнойной раны осуществляется за короткое время. Необходимые величины  $H_A$  и  $f$  легко получить с помощью электромагнита. Отсутствуют трудности и в получении магнитных гранул, обладающих необходимыми свойствами. Основной причиной существенного увеличения эффективности предлагаемого метода, по сравнению с приведенным в [12], является замена полимерной составляющей гранул с полистирола на поливиниловый спирт. Он обладает высокими абсорбционными характеристиками, что подтверждается многолетним использованием этого полимера в медицинской практике. Простота и эффективность способа очистки гнойных ран с помощью магнитооживленного слоя открывают широкую перспективу для его применения в клинике.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частицы железа, связанные с полимерными абсорбентами, могут легко удерживаться в межполюсном пространстве электромагнитов, включаемых в сеть переменного тока поочередно и создающих постоянно действующее магнитное поле с переменным направлением градиента напряженности. В таких условиях железосодержащие частицы или гранулы находятся в подвижном (оживленном) состоянии, но при этом удерживаются в зоне действия магнитного поля. Интенсивность движения частиц, то есть их перемешивания, можно варьировать в достаточно широких пределах путем изменения характеристик внешних магнитных полей. Проведенные эксперименты дают основание предполагать достаточно широкую перспективу для применения магнитоуправляемых процессов сорбции и десорбции в практической медицине, в частности для совершенствования гемосорбирующих технологий, для разработки и внедрения методов локализации лекарственных препаратов в кон-

кретном участке (ткани, органе) организма и управления скоростью их встречи с субстратом – мишенью. Не утрачивают практическую значимость и магнитотвердые ферриты. Использование гранул феррит – сорбент существенно увеличивает эффективность магнитооживления (в переменном магнитном поле) как инструмента лечения гнойных ран. Например, замена в составе магнитопластовых гранул полистирола на поливиниловый спирт увеличивает эффективность метода в ~ 9 раз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Khizhenkov P.K., Makmak I.M., Mironova G.I. Self-scattering and Space Localization of a Magnetic Fluidization Layer. 2. *Magnetohydrodynamics*. 1996, **32**(3), 346–348.
2. Khizhenkov P.K., Makmak I.M., Mironova G.I., Svirchikov V.N. The Improved Method Magnetic Fluidization for Medical Application. *Abstract of the International Conference on Magnetism*. 1997. 27 July – 1 august 1997. Cairus Convention Centre, Australia. ICM, 1997. K2–49.
3. Кафаров В.А., Логвиненко Д.Д., Цанткер К.Л. Области применения аппаратов с вихревым слоем, создаваемым электромагнитным полем. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1974, (11), 18–21.
4. Ветлугина Н.А., Болога М.К., Гофман М.С. Интенсификация массоотдачи в аппарате с магнитооживленным слоем. *Процессы и аппараты технологии неорганических веществ*. 1982, (54), 59–62.
5. Сюткин С.В., Болога М.К., Осипов Д.Г. О прикладных аспектах магнитооживленного слоя. *3-я Всесоюзная школа-семинар по магнитным жидкостям. Тезисы*. М., 1983. 39–40.
6. RF 2204984 1974, *Netoyage Par Particules Magnetiques*.
7. Кузнецов Ю.Н., Абросимов В.А., Ляпунов В.И. и др. Электромагнитное измельчение материалов. *Электронная обработка материалов*. 1976, (3), 39–41.
8. Стручков Ю.В. *Профилактика нагноения и лечение гнойных ран*. Автореф. дис. докт. мед. наук. М., 1982.
9. Даценко Б.М., Белов С.Г., Тамм Т.И. *Гнойная рана*. Киев: Здоровье, 1985. 61 с.
10. Шалимов А.А., Тульчинский Л.Н., Жуковский П.Г. и др. Разработка метода лечения гнойно-воспалительных процессов с использованием магнитокерамических сфер под воздействием электромагнитного поля. *3-я Всесоюзная конференция по применению магнитных жидкостей в биологии и медицине. Тезисы*. Сухуми, 1989. 147–148.
11. Ахалая М.Г., Закарая К.А., Какиашвили М.С., Эмухвари Д.Г. Опыт применения магнитных жидкостей при лечении гнойно-воспалительных заболеваний. *4-я Всесоюзная конференция по применению магнитных жидкостей в биологии и медицине. Тезисы*. Сухуми, 1991. 17–18.
12. Khizhenkov P.K., Zhadinskii N.V. Application of Magnetofluidization in Experimental Medicine. *Magnetohydrodynamics*. 1991, **27**(2), 228–230.
13. Кузин М.И., Костюченко Б.М. *Раны и раневая инфекция*. М.: Медицина, 1981. 461 с.
14. Khizhenkov P.K., Bilobrov V.M., Fichichyan V.P. The Features of Magnetic Fluidization in Variable Fields. *Magnetohydrodynamics*. 1989, **25**(2), 264–267.

Поступила 01.11.11

После доработки 24.11.11

#### Summary

Sorbition characteristics of magnetoplastic granules consisted of the fine-dispersed iron particles and magnetic hard ferrites in polyvinyl alcohol have been investigated. The possibility to control the time characteristics of sorbition and desorbition processes by means of magnetic fields was shown. Field with variable direction of the strength gradient decreases the time characteristics of sorbition-desorbition processes by factor of 7–10, and permanent field effect increases this time by factor of 1.3–2.5. It was also shown that use of sorbents in the composition of magnetic hard granules for methods of festering wounds treatment on the base of magnetofluidization in the variable fields increased the treatment efficiency by factor of 9.