



УДК 541.543

## Наноалмазы, импрегнированные в целлюлозную матрицу, для хроматографической очистки белков

Севостьянова А.А., Меленевский А.Т., Демин А.А.,  
Павлова Е. Н., Никифорова Е.С.

*Учреждение Российской Академии Наук  
Институт Высокомолекулярных Соединений РАН, Россия, Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 20.05.2011 г.

### Аннотация

Создание композиционных сорбентов, включающих наноалмазы, является актуальной задачей для очистки белков. Был синтезирован ряд композиционных сорбентов, матрица которых представлена гранулами высокопроницаемой целлюлозы. При изменении условий синтеза (рН, соотношение между количеством диацетата целлюлозы и наноалмазов) были получены сорбенты с различными кинетико-динамическими характеристиками. Было показано, что возможно подобрать условия синтеза, обеспечивающие переход от неравновесного к квазиравновесному режиму сорбции.

**Ключевые слова:** импрегнирование, наноматериалы, целлюлоза, хроматография

Synthesis of composite sorbent which matrix includes nanodiamonds is an actual task for purification of proteins. For this purpose the series of composite sorbents were synthesized. Granules of high-permeability cellulose are matrix of these sorbents. With the change of synthesis conditions, such as: pH, ratio between diacetate cellulose – nanodiamonds we can obtain sorbents with various kinetic and ion-exchange capacity characteristics. At the same time it is possible to determine synthesis conditions to change non-equilibrium regime of sorption to quasi-equilibrium one.

**Keywords:** impregnation, nanomaterials, cellulose, chromatography

### Введение

В настоящее время активно ведется разработка новых ионообменных сорбентов. Детонационные наноалмазы (НА) представляют особый интерес благодаря возможности их использования в качестве сорбента. Это обусловлено как физико-химическими свойствами НА (в первую очередь большим количеством поверхностных реакционно-способных групп), так и биохимическими (низкой токсичностью и высокой биосовместимостью). Анализ литературных данных показывает, что процессы биосепарации с использованием НА проводили в статических условиях (in batch) [1, 2], что связано с их небольшими размерами (около 4-6 нм). Поэтому создание композиционных сорбентов, в матрице которых импрегнированы НА, является важной задачей для выделения биологически активных веществ в динамических условиях.

С этой целью нами были получены образцы композиционных сорбентов, матрицей которых являются гранулы высокопроницаемой целлюлозы, что обеспечивает проведение динамического процесса сорбции с достаточно большой скоростью. Стоит отметить, что полимерная целлюлоза инертна, обладает высокой пористостью и не влияет на процесс сорбции, что позволяет использовать ее в качестве матрицы композиционного сорбента. В работе была успешно применена методика синтеза целлюлозных сорбентов с включением дисперсных частиц, развитая в 70-е годы прошлого века в Институте высокомолекулярных соединений РАН [3, 4]. Благодаря данной методике была показана возможность получения сорбента для концентрирования целевых компонентов в динамических условиях.

Эффективность технологии очистки белков с помощью создаваемых композиционных сорбентов проверялась на примере хроматографии белков, различающихся по своей природе и структуре. В качестве модельных белков были выбраны рибонуклеаза и инсулин, основной и кислый белки соответственно. Был проведен ряд опытов по сорбции и десорбции данных белков на различных образцах композиционных сорбентов, полученных при использовании очищенной и промышленной диацетат целлюлозы (ДАЦ) и варьировании условий синтеза, а именно соотношения ДАЦ:НА и рН среды. Также были определены полная обменная емкость по ионам натрия (ПОЕ) и сорбционные емкости по инсулину и рибонуклеазе.

Актуальность выбранного направления объясняется интересом в разработке новых сорбентов для выделения и очистки биологически активных веществ.

### ***Материалы и методы исследования***

Для работы применяли НА, поставляемые ООО Технологическим центром «Наноплан». Наноалмазы представляют собой объект, имеющий, по крайней мере, трехслойную структуру [5, 6]:

— прочное, химически инертное алмазное ядро размером 4-6 нм, охватывающее 70-90% углеродных атомов;

— переходную углеродную оболочку вокруг ядра из графитоподобных структур углерода толщиной 0,4-1,0 нм, в которую может входить 10-30% углеродных атомов;

— поверхностный слой, включающий, кроме углеродных атомов, и другие гетероатомы (N, O, H), образующие широкий спектр разнообразных функциональных группировок.

В качестве матрицы композитов использовались гранулы высокопроницаемой целлюлозы. Структура сферической целлюлозы, полученной на основе диацетата целлюлозы, отличается широким распределением пор по размерам [7].

Коэффициенты распределения белков между раствором и гранулами целлюлозы равны единице, то есть целлюлоза является практически инертным материалом по отношению к белкам [3,4].

В качестве модельных белков использовали свиной инсулин, предоставленный Институтом гормональных препаратов и кровезаменителей (г. Москва) и рибонуклеаза (завод медицинских препаратов, г. Санкт-Петербург).

Инсулин относится к кислым белкам (pI=5,4). Молекулы инсулина могут образовывать димеры, тетрамеры и гексамеры в зависимости от рН. При рН=2,5 инсулин может образовывать димеры с относительной молекулярной массой 12000.

Рибонуклеаза представляет собой одноцепочечный полипептид основного характера ( $pI=9,4$ ). Относительная молекулярная масса рибонуклеазы 14000.

Модельный раствор кислого белка готовился из свиного инсулина путём растворения его в 0,1М ацетатном буферном растворе с  $pH=2,5$ . Концентрация инсулина в растворе 1 мг/мл.

Модельный раствор основного белка готовился из препарата «Рибонуклеаза» путём растворения его в 0,1М фосфатном буферном растворе с  $pH=6,5$ . Концентрация рибонуклеазы в растворе 1 мг/мл.

В ходе исследований варьировали условия синтеза, а именно:  $pH$ , соотношение ДАЦ – НА. В результате были получены образцы с различными емкостными и кинетическими характеристиками.

Также было проведено исследование возможности применения промышленной ДАЦ для синтеза матрицы композиционного сорбента.

Было проведено определение полной обменной ёмкости образцов сорбентов по малому иону ( $Na^+$ ) (ПОЕ на мл сорбента).

ПОЕ образцов композиционного сорбента находились в пределах 0,2-0,3 мг-экв/мл.

Таблица 1. Сравнение ПОЕ и емкостей по инсулину и рибонуклеазе для разных образцов

№ образца	ПОЕ, мг-экв/мл	Qинс**, мг/мл	Qриб***, мг/мл
Наноалмаз*	1,4	-	-
Образец №1 очищенная ДАЦ, стандартное pH, ДАЦ:НА=1:1X	0.2	9.7	7.4
Образец №2 очищенная ДАЦ, стандартное pH, ДАЦ:НА=1:2X	-	4.5	10.7
Образец №3 промышленная ДАЦ, стандартное pH, ДАЦ:НА=1:1X	0.2	3.7	-
Образец №4 промышленная ДАЦ, стандартное pH, ДАЦ:НА=1:2,5X	0.3	5.4	-
Образец №5 очищенная ДАЦ, выше pH, ДАЦ:НА=1:1X	-	5.1	7.3

\*ПОЕ наноалмазов измерялась на 1 г сухого образца; \*\* Сорбционная емкость по инсулину; \*\*\* Сорбционная емкость по рибонуклеазе.

Концентрации белков в растворах определяли спектрофотометрическим методом. Измеряли оптическую плотность данных растворов в максимуме полосы поглощения (278 нм). Концентрацию определяли по заранее построенным градуировочным зависимостям оптической плотности растворов индивидуальных белков от их концентрации.

Промышленную ДАЦ очищали от примесей путем переосаждения. Переосаждение ДАЦ проводилось из органической фазы в водную. После переосаждения и тщательной промывки дистиллированной водой очищенную ДАЦ сушили при 40 °С.

Выход очищенной ДАЦ составляет около 75%, что говорит о значительном количестве примесей. Можно предположить, что при использовании в синтезе сорбента промышленной ДАЦ в полимерную сетку могут включаться примеси, вследствие чего сетка становится менее регулярной.

Динамические эксперименты проводились на колонке с внутренним диаметром 0,48 см и высотой слоя сорбента 3,9 см. Скорость подачи растворов белков при сорбции также была постоянной для всех образцов, а именно 33 мл/(час·см<sup>2</sup>). При десорбции скорость подачи растворов белков составляла 16,5 мл/(час·см<sup>2</sup>).

Перед началом работы проводилось несколько циклов регенерации образцов сорбентов последовательно 0,25 н NaOH и 0,25 н HCl. Далее сорбенты подвергались тщательной отмывке водой до нейтрального значения pH.

Далее сорбенты уравнивались ацетатным буферным раствором с pH=2,5 для сорбции инсулина и фосфатным буферным раствором с pH=6,5 для сорбции рибонуклеазы. Затем через сорбенты с постоянной скоростью пропускали модельные растворы белков.

После процесса сорбции белков колонку промывали ацетатным (инсулин) или фосфатным (рибонуклеаза) буферным раствором. Десорбцию вели 0,1 н раствором NaOH.

На основании экспериментальных данных строили выходные кривые сорбции в координатах:

$$C_i/C = f((V-V_0)/V_k),$$

где  $C_i$  – концентрация белка в пробе, мг/мл;  $C$  – концентрация белка в исходном растворе, мг/мл;  $V$  – объем фракции, мл;  $V_k$  – объем колонки, мл;  $V_0$  – свободный объем колонки, мл.

Выходные кривые десорбции строились в координатах:

$$C_i/C_{\max} = f((V-V_0)/V_k),$$

где  $C_{\max}$  – максимальная концентрация инсулина на выходе из колонки, мг.

Сорбционную емкость по белку оценивали по площади над динамической выходной кривой в координатах  $C_i - V$ . Варьируя условия синтеза композиционного сорбента, старались получить образец с высокой сорбционной емкостью по белку и режимом сорбции близкому к регулярному. Под регулярным режимом понимается такое состояние системы сорбент-раствор, когда между фазами существует равновесие, то есть насыщение сорбента идет последовательно в каждом элементарном срезе сорбента, и только после насыщения всех слоев появляется проскок вещества. При нерегулярном режиме проскок появляется сразу.

## Обсуждение результатов

В ходе эксперимента были синтезированы образцы композиционного целлосорбента с различным соотношением ДАЦ:НА и исследованы их сорбционные свойства. На рис. 1 приведена микрофотография образцов 1 и 2 с различным заполнением микродисперсными агломератами НА.

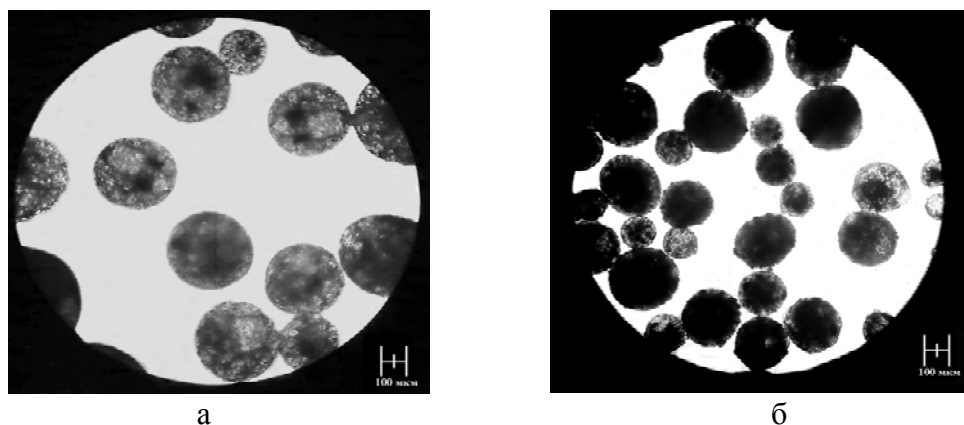


Рис. 1. Микрофотография образца №1 (а) и №2, синтезированных на очищенной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х и 1:2Х, соответственно

На рисунке отчетливо можно увидеть отдельные микродисперсные агломераты НА (включения черного цвета в гранулах) внутри целлюлозной матрицы. Гранулы композиционного сорбента имеют шарообразную форму.

Сравнивая образцы №1 и №2 с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х и ДАЦ:НА=1:2Х соответственно, можно заметить, что при увеличении количества НА использованных при синтезе сорбента возрастает число гранул с большим заполнением НА.

На рис. 2 приведены выходные кривые сорбции инсулина и рибонуклеазы на двух образцах с различным соотношением ДАЦ:НА. Матрица обоих образцов синтезирована с применением очищенной ДАЦ.

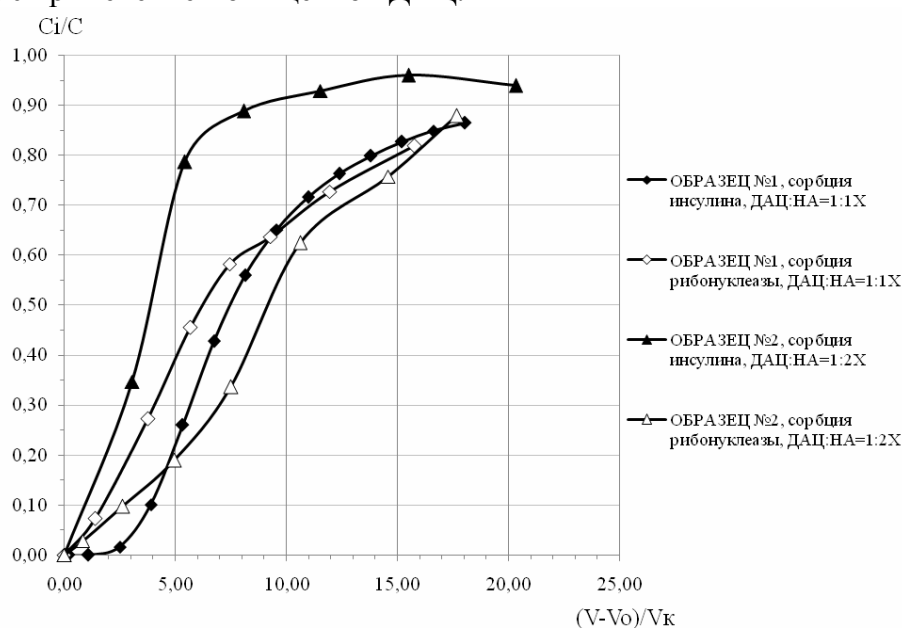


Рис. 2. Выходные кривые сорбции инсулина и рибонуклеазы на образцах композиционного сорбента, синтезированных на очищенной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х (образец №1) и ДАЦ:НА=1:2Х (образец №2)

Сравнивая выходные кривые сорбции инсулина и рибонуклеазы на композиционном сорбенте с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х можно сказать, что образец сорбента обладает сорбционной емкостью как по отношению к кислым, так и к основным белкам. Однако выходная кривая сорбции инсулина имеет более

широкое плато и более резкий подъём, что говорит о режиме более близком к регулярному по сравнению с выходной кривой, полученной для рибонуклеазы. Тем не менее, значительных различий между выходными кривыми сорбции инсулина и рибонуклеазы на образце №1 не наблюдается. Отсюда следует, что данный образец в одинаковой степени применим для сорбции как кислых, так и основных белков.

Из рис. 2 видно, что выходные кривые сорбции инсулина и рибонуклеазы на образце с соотношением ДАЦ:НА=1:1X заметно отличаются от выходных кривых сорбции белков, полученных на образце с соотношением ДАЦ:НА=1:2X. Причем, при увеличении количества нанодIAMONтов в синтезе сорбента кинетика сорбции для инсулина и рибонуклеазы изменяется неодинаково.

Предполагалось, что увеличение количества НА в синтезе сорбента приведет к увеличению сорбционной емкости как по основным, так и по кислым белкам, за счет увеличения количества сорбционных центров (см. выше). Однако в случае сорбции инсулина на образце №2, с соотношением ДАЦ:НА=1:2X, происходит снижение сорбционной емкости по инсулину практически в два раза, в отличие от сорбции рибонуклеазы на том же образце. Уменьшение сорбционной емкости по инсулину с увеличением количества НА в синтезе композиционного целлосорбента, возможно, может быть связано с ухудшением проницаемости микродисперсных агломератов НА для инсулина.

Сорбционная емкость по рибонуклеазе (рис. 2) при увеличении количества микродисперсных агломератов НА в синтезе образца №2, изменяется незначительно. Анализируя полученные результаты можно предположить, что сорбция кислых и основных белков композиционного сорбента осуществляется по различным механизмам.

Выходные кривые десорбции инсулина с образцов с различным соотношением ДАЦ:НА приведены на рис. 3.

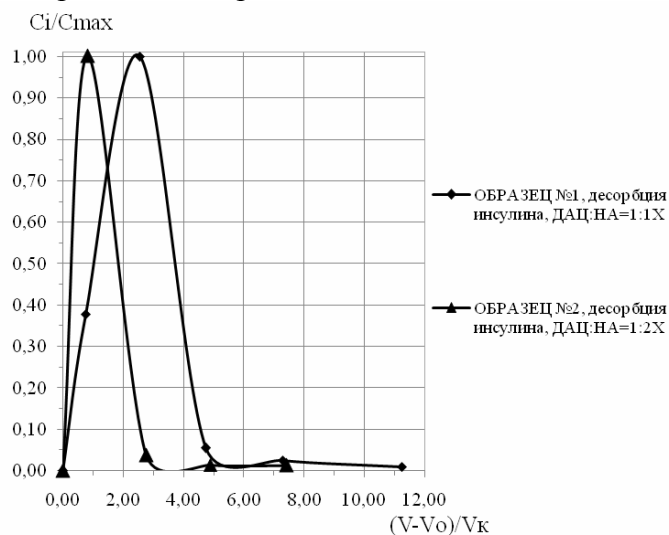


Рис. 3. Выходные кривые десорбции инсулина с образцов композиционного сорбента, синтезированных на очищенной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1X (образец №1) и ДАЦ:НА=1:2X (образец №2)

Сравнивая выходные кривые десорбции инсулина можно отметить, что, выходная кривая десорбции для образца целлосорбента с соотношением ДАЦ:НА=1:2X менее симметрична, чем для образца сорбента с соотношением ДАЦ:НА=1:1X, что также подтверждает предположение об ухудшении диффузии инсулина в агломераты НА при увеличении количества НА в синтезе сорбента.

Особый интерес представляет возможность использования промышленной ДАЦ для синтеза матрицы композиционного сорбента, импрегнированного микродисперсными агломератами НА. Процесс очистки промышленной ДАЦ является дополнительной стадией в подготовке к синтезу сорбента и, следовательно, требует внесения дополнительных средств и ресурсов. Несмотря на простоту процесса переосаждения ДАЦ, данный метод является достаточно ресурсо- и трудоемким.

Для определения возможности применения в процессе синтеза промышленной ДАЦ были получены образцы на исходном сырье и переосаждённой ДАЦ. Выходные кривые сорбции и десорбции инсулина представлены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

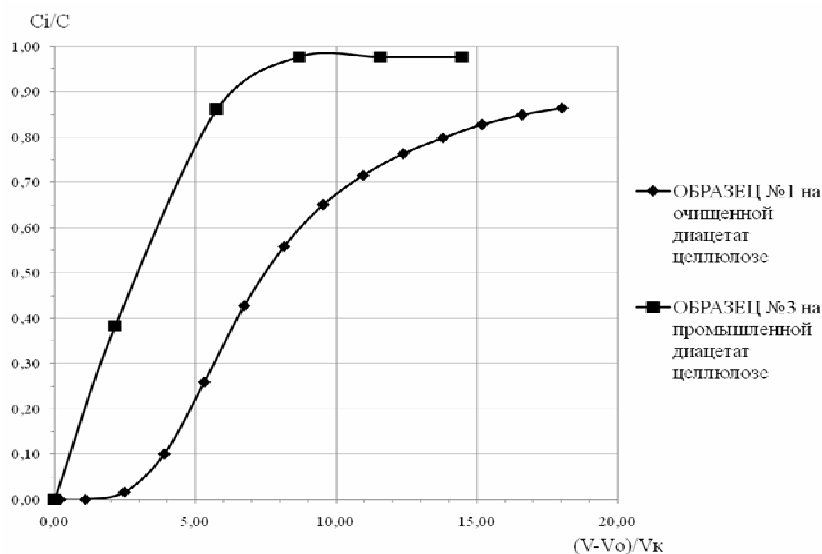


Рис. 4. Выходные кривые сорбции инсулина на образцах с соотношением ДАЦ:НА=1:1X, синтезированных на очищенной ДАЦ (образец №1) и промышленной ДАЦ (образец №3)

Выходные кривые сорбции инсулина на полученных образцах демонстрируют сильное влияние структуры целлюлозной матрицы на кинетические характеристики сорбентов. Образец, синтезированный с применением очищенной ДАЦ, характеризуется значительно большей сорбционной емкостью по инсулину и приближением к регулярному режиму, в отличие от образца, полученного с применением промышленной ДАЦ. Анализируя полученные результаты можно отметить значительное улучшение проницаемости сорбента для белка, полученного на переосаждённой ДАЦ по сравнению с промышленной ДАЦ.

Выходная кривая десорбции, соответствующая образцу, полученному на основе очищенной ДАЦ, несколько более симметрична по сравнению с образцом на основе промышленной ДАЦ. Однако значительных различий между выходными кривыми десорбции с образцов №1 и №3 не наблюдается, что говорит о возможности использования образца, полученного на промышленной ДАЦ, для концентрирования белка.

Таким образом, можно сказать, что промышленную ДАЦ возможно использовать для получения целлюлозной матрицы, импрегнированной НА. Однако применение очищенной ДАЦ в синтезе композиционного целлосорбента предпочтительно.

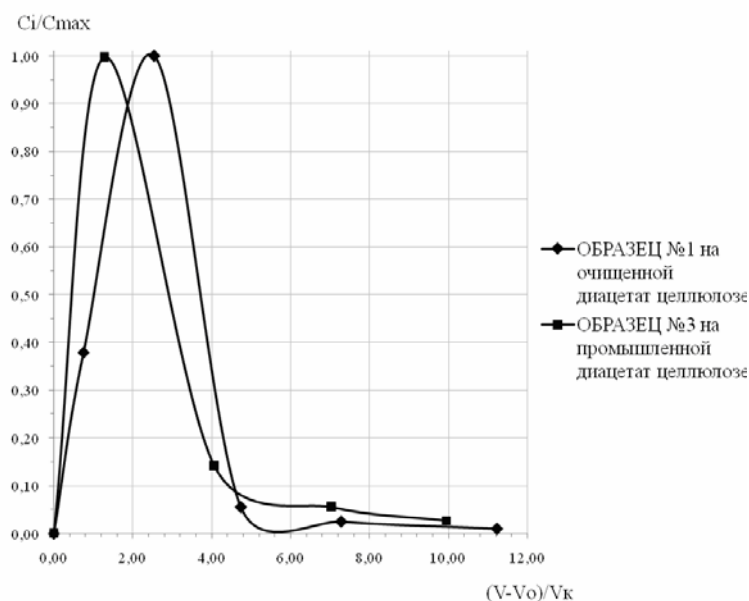


Рис. 5. Выходные кривые десорбции инсулина с образцов с соотношением ДАЦ:НА=1:1X, синтезированных на очищенной (образец №1) и промышленной ДАЦ (образец №3)

Использование промышленной ДАЦ характеризуется меньшими экономическими затратами, чем переосажденной ДАЦ. Однако образцы композиционного сорбента, полученные на промышленной ДАЦ, имеют меньшую сорбционную емкость по белку и характеризуются нерегулярным режимом сорбции, в отличие от образцов на очищенной ДАЦ. Повысить сорбционную емкость по белку можно путем увеличения числа сорбционных центров, а именно увеличением количества НА в синтезе сорбента. Как было показано ранее увеличение количества НА в синтезе может давать положительный эффект только в определенных пределах. При большом заполнении гранул сорбента микродисперсными агломератами НА ухудшается их проницаемость для белка, и, следовательно, уменьшается доступность сорбционных центров для белка. Проницаемость белка, скорее всего, также зависит от агломерации НА. Из литературных данных известно, что на агломерацию частиц НА влияет рН среды [8, 9]. По этой причине было решено провести эксперимент с изменением рН среды и количества НА в синтезе композиционного сорбента.

На рис. 6 и рис. 7 представлены выходные кривые сорбции и десорбции инсулина на образцах с различным соотношением ДАЦ:НА и рН.

Сравнивая выходные кривые сорбции образцов №3 и №4, синтезированные с применением промышленной ДАЦ, можно заметить, что при переходе от образца с соотношением ДАЦ:НА=1:1X к ДАЦ:НА=1:2,5X (и увеличением рН) сорбционная емкость по белку увеличивается. Противоположную картину мы наблюдали при увеличении количества НА в синтезе образцов, полученных на очищенной ДАЦ (см. выходные кривые сорбции инсулина образцов №1 и №2 на очищенной ДАЦ на рис. 2). Возможно, что с увеличением рН меняется структура целлосорбента и становится доступно большее число сорбционных центров микродисперсных агломератов НА для инсулина.



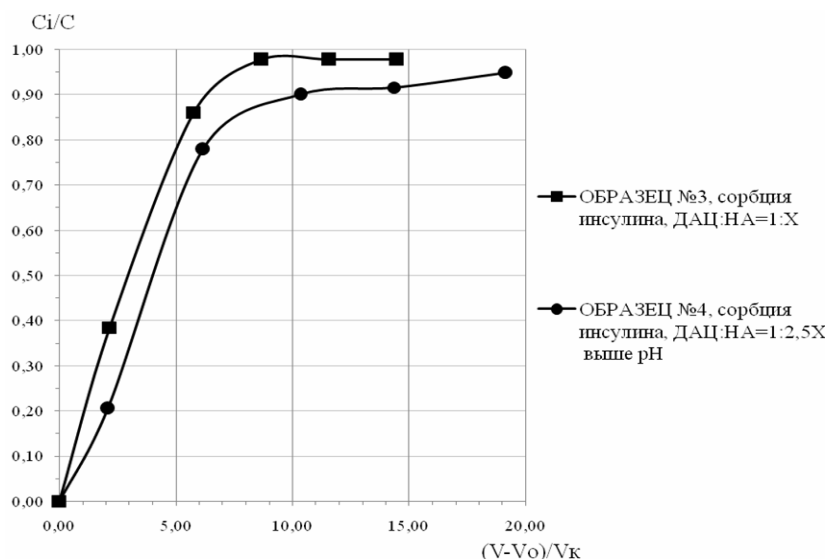


Рис. 6. Выходные кривые сорбции инсулина на образцах, полученных на промышленной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х (образец №3) со стандартным рН и ДАЦ:НА=1:2,5Х с повышенным значением рН среды (образец №4)

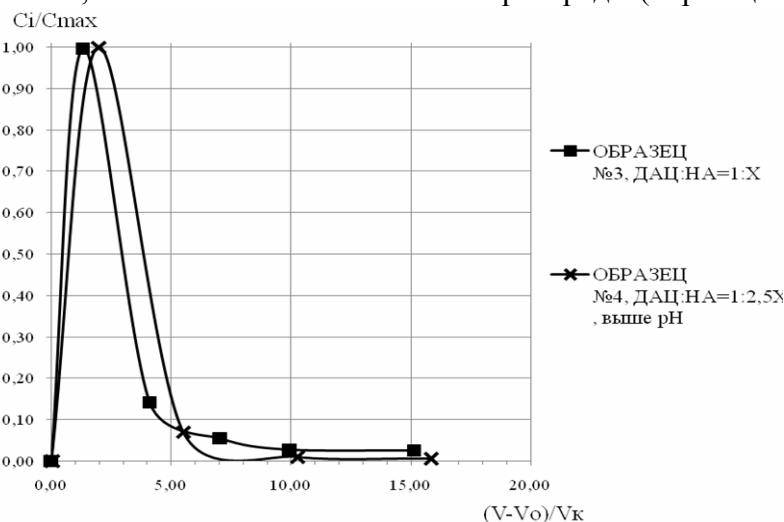


Рис. 7. Выходные кривые десорбции инсулина с образцов, полученных на промышленной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1Х (образец №3) со стандартным рН и ДАЦ:НА=1:2,5Х и повышенным значением рН среды (образец №4)

При использовании образца №4 (повышенное значение рН реакционной среды при синтезе и соотношением ДАЦ:НА=1:2,5Х) выходная кривая десорбции инсулина подобна выходной кривой десорбции инсулина, полученной на образце со стандартным значением рН реакционной среды и соотношением ДАЦ:НА=1:Х. Этот результат свидетельствует об отсутствии ухудшения проницаемости сорбента для инсулина.

На основании результатов эксперимента, полученных при увеличении рН среды при синтезе сорбентов с использованием промышленной ДАЦ, был сделан вывод о заметном влиянии рН как на кинетические, так и равновесные характеристики сорбции для инсулина. Также был проведен ряд экспериментов по синтезу сорбентов с использованием очищенной ДАЦ при варьировании рН среды. Сравнение выходных кривых сорбции инсулина на образцах, различающихся рН реакционной среды, приведено на рис.8.

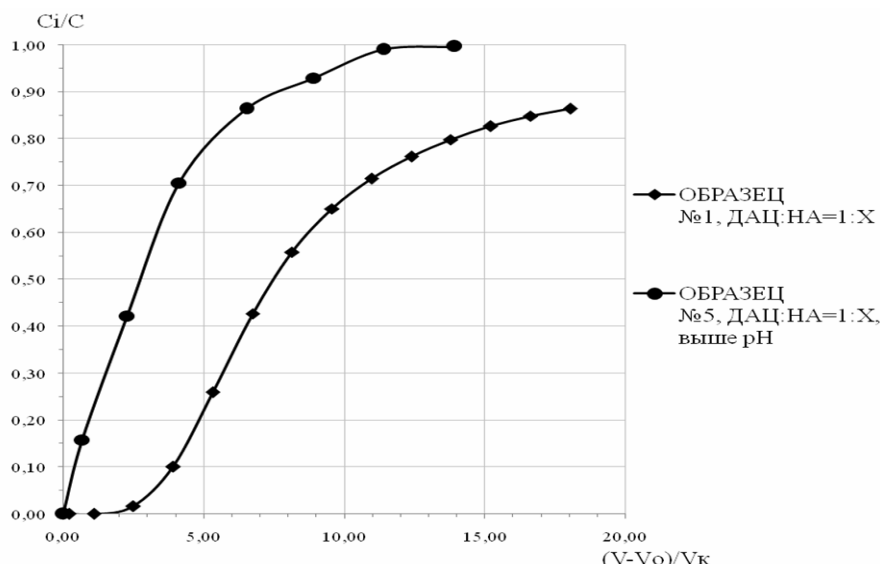


Рис. 8. Выходные кривые сорбции инсулина на образцах, полученных на очищенной ДАЦ, с соотношением ДАЦ:НА=1:1X со стандартным рН (образец №1) и с увеличенным значением рН реакционной среды (образец №5)

Оказалось, что при использовании очищенной ДАЦ на данных образцах зависимость от рН совершенно противоположная, чем для образцов, синтезированных на промышленной ДАЦ (см. рис. 6). При увеличении рН резко уменьшается сорбционная емкость по инсулину. По-видимому, при изменении рН среды изменяется способность НА к агрегации [8, 9], а применение очищенной ДАЦ обеспечивает получение матрицы более равномерной структуры, изменяются и сорбционные характеристики сорбента в целом.

При проведении опытов на ряде образцов композиционного сорбента было отмечено, что для сорбции и десорбции инсулина на образцах, синтезированных с использованием очищенной ДАЦ, увеличение рН среды и количества микродисперсии НА при синтезе сорбента приводит к ухудшению кинетических характеристик и сорбционной емкости по белку. Однако, зависимость для выходных кривых сорбции рибонуклеазы на образцах с различным соотношением ДАЦ:НА совершенно иная, чем для инсулина (см. рис. 2). Особый интерес представляло изучение влияния увеличения рН среды при синтезе сорбента на сорбцию рибонуклеазы.

На рис. 9 представлены выходные кривые сорбции рибонуклеазы на образцах с различным соотношением ДАЦ: НА и рН реакционной среды.

Сравнивая выходные кривые сорбции рибонуклеазы на образцах №1, №2 и №5, можно сказать, что при увеличении рН среды и количества НА в синтезе сорбента не происходит значительного изменения сорбционной емкости по белку по сравнению с образцом, имеющим стандартное значение рН и соотношение ДАЦ:НА=1:1X, что противоположно данным полученным для инсулина. Полученные данные подтверждают предположение о различии механизмов сорбции для кислого и основного белков на композиционном сорбенте, матрица которого импрегнирована микродисперсными агрегатами НА.

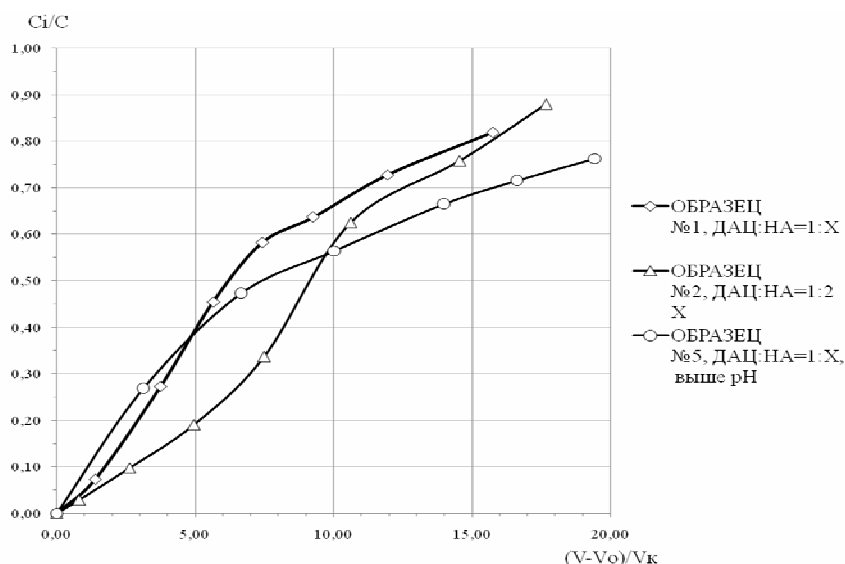


Рис. 9. Выходные кривые сорбции рибонуклеазы на образцах, полученных на очищенной ДАЦ, со стандартным рН с соотношением ДАЦ:НА=1:1X (образец №1) и ДАЦ:НА=1:2X (образец №2), а также с повышенным значением рН и соотношением ДАЦ:НА=1:1X (образец №5)

## Заключение

Получены образцы композиционных сорбентов с НА при различных условиях синтеза. Показано, что изменяя условия синтеза можно создать сорбенты, обладающие различными кинетико-динамическими характеристиками.

Показано, что на процесс синтеза и свойства композиционного сорбента заметно влияет чистота используемой ДАЦ.

Показана возможность сорбции как кислых, так и основных белков.

## Список литературы

1. Chung, P.-H. Spectroscopic study of bio-functionalized nanodiamonds / Diamond and related materials. – 2006. – Vol.15. – №4-8. – P. 622-625.
2. Puzyr', A. P. Nanodiamonds with novel properties: A biologic study / A. P. Puzyr', A. V. Baron, K. V. Purtov, E. V. Bortnikov, N. N. Scobelev, O. A. Mogilnaya, V. S. Bondar' // Diamond and related materials. – 2007. – Vol. 16. – №12. – С. 2124-2128.
3. Самсонов Г.В., Меленевский А.Т. // Сорбционные и хроматографические методы физико-химической биотехнологии. Л.: Наука. 1986. 230 с.
4. Папукова К. П., Никифорова Е. С., Ежова Н. М., Самсонов Г. В. Способ получения композиционных анионитов. Патент РФ №1819272. – 1993.
5. Алексенский, А.Е. Структура алмазного нанокластера / А.Е. Алексенский [и др.] // Физика твердого тела. – 1999. – №4. – С. 740-743.
6. Долматов, В.Ю. К вопросу о строении кластера детонационного наноалмаза / В.Ю. Долматов // Сверхтвердые материалы. – 2005. – №1. – С. 28-32.
7. Лесене, Й. В. Получение целлюлозных гранул из растворов ацетилцеллюлозы / Й. В. Лесене, А. В. Марушка, Б. Н. Моцкайтите // Химия древесины. – 1987. – №4. – С. 36-40.

8. Долматов, В. Ю. Современная промышленная технология получения детонационных наноалмазов (НА) и основные области их использования / В. Ю. Долматов // Нанотехника. – 2008. - №1. – С. 56-78.

9. Пузырь, А.П. Наноструктуры на основе частиц взрывного синтеза и белковых молекул / А.П. Пузырь [и др.] // Доклады АН. РАН. Т. 373. – 2000. – С. 251.

---

**Демин Александр Александрович** – ст. науч. сотрудник, д.х.н., Учреждение Российской академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, тел. (812)3288547

**Севостьянова Арина Анатольевна** – инженер-исследователь, Учреждение Российской академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург

**Меленевский Александр Тарасович** – ст. науч. сотрудник, к.х.н., Учреждение Российской академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, тел. (812)3288547

**Павлова Екатерина Николаевна** – мл. науч. сотрудник, Учреждение Российской академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург

**Никифорова Елена Сергеевна** – науч. сотрудник, Учреждение Российской академии наук Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург

**Demin Alexander A.** – Doctor of Science, Head of the Laboratory, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Macromolecular Compounds Russian Academy of Sciences, St Petersburg, [demin@imc.macro.ru](mailto:demin@imc.macro.ru)

**Sevostyanova Arina A.** – engineer, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Macromolecular Compounds Russian Academy of Sciences, St Petersburg

**Melenevsky Alexander T.** – research associate, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Macromolecular Compounds Russian Academy of Sciences, St Petersburg, [melenev@imc.macro.ru](mailto:melenev@imc.macro.ru)

**Pavlova Ekaterina N.** – research associate, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Macromolecular Compounds Russian Academy of Sciences, St Petersburg

**Nikiforova Elena S.** – research associate, Institution of Russian Academy of Sciences Institute of Macromolecular Compounds Russian Academy of Sciences, St Petersburg