

**Б.П. Яцик, Л.Ю. Юрлова, Г.Н. Пшинко, А.П. Криворучко**

## **ПРОИЗВОДНЫЕ ПОЛИАКРИЛАМИДА КАК РЕАГЕНТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОД ОТ U(VI) И Cr(VI)**

Институт коллоидной химии и химии воды им. А.В. Думанского  
НАН Украины, г. Киев

*Исследовано влияние водорастворимых высокомолекулярных полиэлектролитов на ультра- и нанофильтрационный процессы очистки вод, загрязненных U(VI) и Cr(VI). В качестве таких соединений использованы производные полиакриламида – катионный и анионный Праестолы. Установлена зависимость степени извлечения U(VI) и Cr(VI) от pH и концентрации Праестолов. Показано, что при использовании последних максимальный коэффициент задерживания U(VI) как ультра-, так и нанофильтрационной мембранами составил 0,999; максимальный коэффициент задерживания Cr(VI) ультрафильтрационной мембраной – 0,65.*

**Ключевые слова:** нанофильтрация, Праестол, полиакриламид, уран, ультрафильтрация, хром.

**Введение.** Защита окружающей среды от загрязняющих веществ является актуальной задачей современности. В связи с этим проблема очистки природных и сточных вод приобретает особо важное значение, так как она тесно связана с охраной водных ресурсов. В последнее время в водах открытых водоемов отмечается повышенное содержание токсикантов органической и неорганической природы вследствие сброса промышленными и коммунальными предприятиями недостаточно очищенных сточных вод. Несмотря на большое количество разработок, отраженных в литературе [1 – 3], проблему очистки природных и сточных вод нельзя считать полностью решенной. Большинство способов очистки загрязненных вод основано на применении реагентов, в качестве которых все больше используют водорастворимые высокомолекулярные вещества [4 – 6]. Их применение позволяет улучшить качество очистки вод, повысить производительность очистных сооружений. Среди используемых высокомолекулярных соединений одними из наи-

© Б.П. Яцик, Л.Ю. Юрлова, Г.Н. Пшинко, А.П. Криворучко, 2013

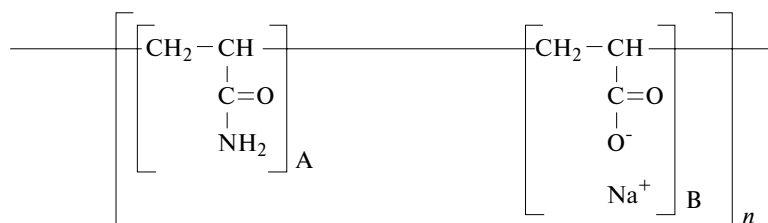
более распространенных и универсальных являются полиакриламидные [7]. В результате их применения достигается высокая степень удаления ионов тяжелых металлов, соединений фосфора, органических и других веществ. К таким соединениям относятся Праестолы (ПР) (нейонной, катионной и анионной природы), которые появились в конце 90-х годов 20 столетия. Они широко используются в коммунальном хозяйстве для очистки и обеззараживания питьевой воды [8, 9]. Кроме того, эти вещества нашли применение в химической, нефтехимической промышленности и целлюлозно-бумажном производстве [10]. Праестолы рекомендованы Госэпиднадзором Российской Федерации для их использования даже в питьевом водоснабжении [10, 11].

Учитывая вышеизложенное, в представленной работе исследовано влияние ПР на извлечение U(VI) и Cr(VI) из загрязненных вод методами ультра- и нанофильтрации.

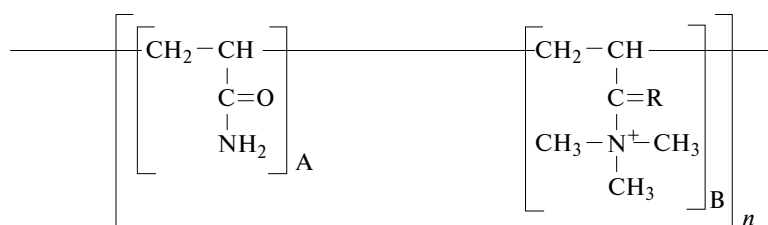
**Методика эксперимента.** Очищали исследуемые растворы (0,5 дм<sup>3</sup>), содержащие 10 мг/дм<sup>3</sup> U(VI) или Cr(VI). Растворы, содержащие уран, готовили из соли UO<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·3H<sub>2</sub>O квалификации "х.ч", растворы, содержащие хром, – из соли K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> квалификации "х.ч" растворением соответствующей навески в дистиллированной воде. Концентрацию U(VI) и Cr(VI) в исследуемых растворах определяли фотометрически: U(VI) – с использованием арсеназо III при  $\lambda = 650$  нм [12], Cr(VI) – дифенилкарбазида при  $\lambda = 550$  нм [13]. Изучено влияние ионной силы растворов, создаваемой NaCl ( $C = 0,01 - 0,2$  М) или CaCl<sub>2</sub> ( $C = 0,005 - 0,2$  М), на извлечение U(VI) и Cr(VI) из загрязненных вод.

В исследованиях применяли анионный и катионный Праестолы. Соединения Праестол – это высокомолекулярные вещества, полученные на основе полиакриламида. Анионные ПР являются сополимерами акриламида с возрастающими долями акрилата, придающими полимерам в водном растворе отрицательный заряд и тем самым – анионный характер. Катионные ПР – это сополимеры акриламида с возрастающей долей катионных сополимеров. Внесенные ими в полимер катионные группы обладают в водных растворах положительными зарядами. В зависимости от ионогенности ПР их взаимодействия основаны на образовании водородных связей, как это имеет место у неионогенных полимеров, или на электростатических взаимодействиях и обмене зарядами. Структурные формулы анионного (I) и катионного (II) ПР можно записать следующим образом:

(I)



(II)



Были изучены анионный Праестол (ПР<sub>2530</sub>) с молекулярной массой ~ 14 млн. ед. и катионный (ПР<sub>650TR</sub>) – ~ 6 млн. ед. Эти реагенты являются продукцией совместного российско-германского производства ЗАО "Компания "Москва-Штокгаузен" (MSP).

При экспериментах концентрации ПР<sub>2530</sub> и ПР<sub>650TR</sub> изменялись в диапазоне соответственно 5,0 – 50 и 0,1 – 30,0 мг/дм<sup>3</sup>.

Исследования проводили в непроточной ячейке объемом 1,0 дм<sup>3</sup> с мембраной площадью 0,95 дм<sup>2</sup> при скорости вращения магнитной мешалки ~ 300 об/мин. Ультрафильтрационные (УФ) эксперименты выполняли при рабочем давлении 200, нанофильтрационные (НФ) – 400 кПа. Рабочее давление было выбрано нами ранее [14, 15] как оптимальное. Отбирали пробы пермеата объемом 40 см<sup>3</sup> до получения стабильных значений коэффициентов задерживания в них U(VI) или Cr(VI). Степень отбора пермеата – 0,6, диапазон pH – 3÷11.

В баромембранных процессах очистки вод, содержащих уран и хром, использовали мембраны УПМ-20 (УФ) и ОПМН-П (НФ). Обе мембраны являются полимерными (производство фирмы "Владипор", Россия). Характеристики мембран приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики использованных мембран

Мембрана	Материал	Размер пор, нм	Максимальное давление, МПа	Рабочий диапазон рН	Производительность по дистиллированной воде, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)
ОПМН-П	Полиамид	< 10	1,6	2–11	25 (при давлении 0,5 МПа)
УПМ-20	Полисульфонамид	~ 20	0,6	2–12	60 (при давлении 0,1 МПа)

Исходя из полученных экспериментальных результатов, были рассчитаны основные характеристики баромембранных процессов:

– коэффициент задерживания удаляемого компонента ( $R$ ), в данном случае U(VI) или Cr(VI) [16]

$$R = 1 - \frac{C_f}{C_0},$$

где  $C_f$  и  $C_0$  – концентрации U(VI) или Cr(VI) соответственно в пермеате и исходном растворе;

– трансмембранный поток ( $J_v$ ) [17]

$$J_v = \frac{V}{S \cdot t},$$

где  $V$  – объем раствора, прошедшего через мембрану площадью  $S$  за единицу времени  $t$ ;

– степень отбора пермеата ( $\phi$ ) [17]

$$\phi = \frac{V_f}{V_0},$$

где  $V_f$  и  $V_0$  – объемы соответственно отбираемого пермеата и исходного раствора.

**Результаты и их обсуждение.** Установлена закономерность извлечения U(VI) ультрафильтрацией при различных концентрациях  $\text{Pr}_{2530}$  и рН 4. Определены коэффициенты задерживания U(VI) УФ-мембраной УПМ-20 и трансмембранный поток (рис. 1).

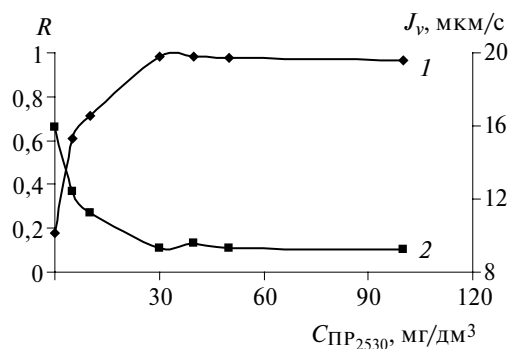


Рис. 1. Зависимость коэффициента задерживания ( $R$ )  $U(VI)$  мембраной УПМ-20 (1) и трансмембранного потока ( $J_v$ ) (2) от концентрации  $ПР_{2530}$  при pH 4.

На основании полученных данных можно заключить, что наиболее эффективные показатели очистки воды, содержащей уран, наблюдаются при концентрации  $ПР_{2530}$ , составляющей 30 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 1, кривая 1). Коэффициент задерживания достигает 0,98. При дальнейшем повышении концентрации до 50 мг/дм<sup>3</sup> коэффициент задерживания остается стабильно высоким, что свидетельствует о практически полном связывании уранил-катионов в комплексы.

Уменьшение коэффициентов задерживания урана при концентрации  $ПР_{2530} < 30$  мг/дм<sup>3</sup> объясняется тем, что используемого количества  $ПР_{2530}$  недостаточно для полного связывания радионуклида в устойчивые комплексы, однако, даже в отсутствие реагента, степень задерживания урана составляет 0,18. При концентрации  $ПР_{2530} > 50$  мг/дм<sup>3</sup> коэффициенты задерживания  $U(VI)$  незначительно, но уменьшаются, возможно, из-за образования агрегатов из самих молекул  $ПР_{2530}$ , а не из комплексов  $U(VI) - ПР_{2530}$  [18].

Трансмембранный поток при повышении концентрации полимера в растворе (см. рис. 1, кривая 2) скачкообразно изменяется, уменьшаясь с 15,8 до 9,3 мкм/с.

Известно, что pH водного раствора существенно влияет на эффективность очистки воды от соединений урана, поскольку в зависимости от значения pH образуются его катионные, нейтральные или анионные комплексы. На рис. 2 представлены результаты по подбору оптимального значения pH для извлечения  $U(VI)$  из исследуемых систем (при наличии и в отсутствие  $ПР_{2530}$ ). Для выяснения, какая именно концентрация  $ПР_{2530}$  является оптимальной, в системах, где присутствовал этот Праестол, его содержание в исследуемых

двух растворах составляло 30 (кривые 1 и 2) и 40 мг/дм<sup>3</sup> (кривые 1' и 2').

Как следует из данных, представленных на рис. 2, при концентрации ПР<sub>2530</sub> 30 (кривая 1) и 40 мг/дм<sup>3</sup> (кривая 1') получены практически одинаковые результаты ( $R = 0,99$ ). Трансмембранный поток при обеих концентрациях в интервале рН 3÷9 изменялся незначительно и находился на уровне 10 – 11 мкм/с. Резкое уменьшение трансмембранного потока происходило при рН > 9 ( $J_v \sim 6 – 8$  мкм/с). Это может быть обусловлено образованием более плотной динамической мембраны из комплексов U(VI) – ПР<sub>2530</sub> и образующихся при указанных значениях рН гидроксокомплексов урана [4], что и приводило к уменьшению трансмембранного потока. При концентрации ПР<sub>2530</sub> 40 мг/дм<sup>3</sup> (кривая 2') трансмембранный поток был несколько меньше, чем при концентрации 30 мг/дм<sup>3</sup> (кривая 2). Это может быть связано с увеличением вязкости системы вследствие повышения концентрации ПР<sub>2530</sub>, что и приводило к уменьшению трансмембранного потока.

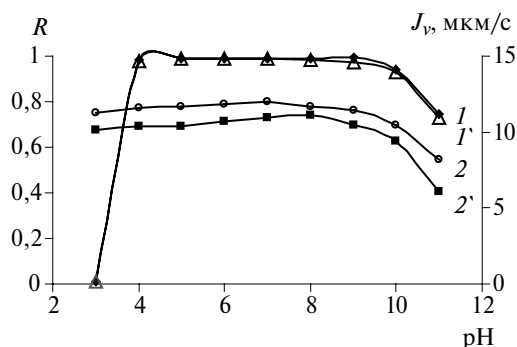


Рис. 2. Зависимость коэффициента задерживания U(VI) мембраной УПМ-20 (1, 1') и трансмембранного потока (2, 2') от рН при концентрации ПР<sub>2530</sub> 30 (1, 2) и 40 мг/дм<sup>3</sup> (1', 2').

Полученные результаты свидетельствуют, что оптимальными условиями для УФ-очистки вод, содержащих уран, являются концентрация ПР<sub>2530</sub>, составляющая 30 мг/дм<sup>3</sup>, и рН раствора 4 – 9.

Кроме ультрафильтрационных, были проведены нанофильтрационные исследования по очистке вод, содержащих уран, с применением ПР<sub>2530</sub> (рис. 3). Из данных указанного рисунка следует, что наиболее эффективный показатель коэффициента задерживания урана

НФ-мембраной ОПМН-П при рН 4 (0,95) получен при концентрации  $PP_{2530}$  30 мг/дм<sup>3</sup>, хотя в данном случае  $R$  несколько ниже аналогичного, полученного с применением УФ-мембраны УПМ-20 (0,99). Этот факт можно объяснить тем, что поры последней намного больше пор мембраны ОПМН-П. Следовательно, некоторые частицы при УФ-очистке могут попадать и в ее поры, уменьшая их, тем самым увеличивая коэффициент очистки вод, содержащих уран, и, как показано выше (см. рис. 1, кривая 2), скачкообразно уменьшая и трансмембранный поток. То есть динамическая мембрана при УФ-очистке может образовываться по механизму, когда частицы не только находятся на поверхности мембраны УПМ-20, но и частично – в ее порах, чего нельзя сказать о НФ-процессе очистки. В этом случае, по-видимому, формируется динамическая мембрана на поверхности исследуемой мембраны и практически не влияет ни на коэффициент задерживания (0,93 – 0,95) (см. рис. 3, кривая 1), ни на трансмембранный поток (кривая 2), поскольку после добавления в систему  $PP_{2530}$  величина трансмембранного потока уменьшается несущественно – с 6,5 до 4,6 мкм/с.

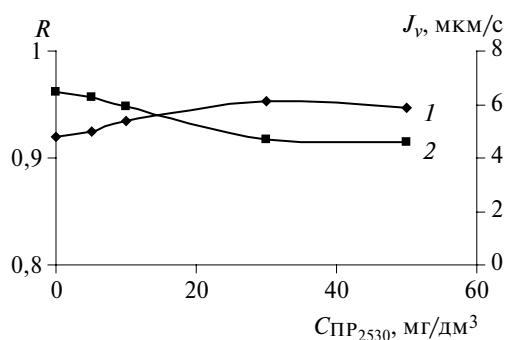


Рис. 3. Зависимость коэффициента задерживания  $U(VI)$  мембраной ОПМН-П (1) и трансмембранного потока (2) от концентрации  $PP_{2530}$  при рН 4.

Также были проведены эксперименты по НФ-очистке вод, содержащих уран, при оптимальной концентрации  $PP_{2530}$  30 мг/дм<sup>3</sup> в диапазоне рН 4÷10. Для сравнения такие же исследования проводили без добавления  $PP_{2530}$ . Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

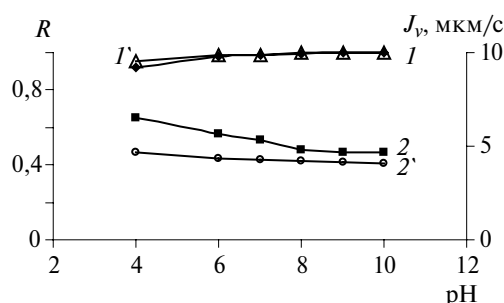


Рис. 4. Влияние pH на коэффициент задерживания U(VI) мембраны ОПМН-П (1, 1') и трансмембранный поток (2, 2') при наличии ПР<sub>2530</sub> (C = 30 мг/дм<sup>3</sup>) (1, 2) и в его отсутствие (1', 2').

Из данных рис. 4 следует, что коэффициенты задерживания U(VI) из загрязненных вод мембраной ОПМН-П в диапазоне pH 6–10 как в присутствии ПР<sub>2530</sub> (кривая 1), так и без него (кривая 1') практически совпадают ( $\approx 0,99$ ). ПР<sub>2530</sub> почти не оказывает влияния на трансмембранный поток (кривые 2 и 2'): в отсутствие ПР<sub>2530</sub>  $J_v$  несколько больше только в диапазоне pH 4–7, тогда как при pH  $\geq 8$  значения  $J_v$  отличаются мало и находятся на уровне 4 мкм/с. На уменьшение трансмембранного потока в НФ-процессе без добавления ПР<sub>2530</sub> в диапазоне pH 4–7, по-видимому, оказывает влияние образование гидроксокомплексов уранила [4], формирующих динамическую мембрану на поверхности мембраны ОПМН-П. Эти комплексы намного меньше по размеру, чем комплексы U(VI) – ПР<sub>2530</sub>, и могут частично перекрывать устья пор мембраны ОПМН-П, уменьшая тем самым трансмембранный поток.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что добавление ПР<sub>2530</sub> в очищаемую воду практически не оказывает влияния на эффективность НФ-очистки вод, содержащих уран.

Также были проведены исследования по влиянию ионной силы растворов, создаваемой NaCl и CaCl<sub>2</sub>, на УФ-извлечение U(VI) из загрязненной воды при концентрации ПР<sub>2530</sub> 30 мг/дм<sup>3</sup> и pH 7,5 (табл. 2). Полученные результаты свидетельствуют о том, что при увеличении ионной силы раствора происходит ухудшение показателей очистки. Коэффициент задерживания U(VI) мембраной УПМ-20 уменьшается с 0,99 до 0,85 в случае добавления NaCl и с 0,99 до 0,36 – при добавлении CaCl<sub>2</sub>. Трансмембранный поток при этом также снижается: с 11,8 до 8,9 и с 11,8 до 7,9 мкм/с при добавлении соответственно NaCl



и  $\text{CaCl}_2$ . Ухудшение показателей очистки ( $R$  и  $J_v$ ) при повышении концентрации добавленных растворов  $\text{NaCl}$  и, особенно,  $\text{CaCl}_2$ , вероятно, связано с явлением концентрационной поляризации и ростом осмотического давления в системе [17]. Кроме того, более резкое снижение коэффициента задерживания  $U(\text{VI})$  при добавлении  $\text{CaCl}_2$  может быть связано с экранированием ионами кальция фиксированного заряда функциональных групп  $\text{PP}_{2530}$ , вследствие чего уменьшается вклад электрохимического механизма в задерживание  $U(\text{VI})$  [19].

Таблица 2. Влияние  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  на коэффициент задерживания ( $R$ )  $U(\text{VI})$  из загрязненных вод и трансмембранный поток ( $J_v$ ) в присутствии  $\text{PP}_{2530}$  при концентрации  $30 \text{ мг/дм}^3$  и  $\text{pH } 7,5$

NaCl			CaCl <sub>2</sub>		
$C_{\text{NaCl}}, \text{M}$	$R$	$J_v, \text{мкм/с}$	$C_{\text{CaCl}_2}, \text{M}$	$R$	$J_v, \text{мкм/с}$
0	0,99	11,8	0	0,99	11,8
0,01	0,98	11,7	0,005	0,75	9,3
0,1	0,92	9,3	0,01	0,60	8,9
0,2	0,85	8,9	0,02	0,36	7,9

Следует отметить, что  $U(\text{VI})$  в катионной форме существует в области  $\text{pH } 4\div 5$  в зависимости от его концентрации в растворе. При более высоких значениях  $\text{pH}$   $U(\text{VI})$  переходит в анионные формы, поэтому были проведены исследования по определению влияния  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  на извлечение  $U(\text{VI})$  из загрязненных вод методом ультрафильтрации (табл. 3).

Таблица 3. Влияние  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  на коэффициент задерживания  $U(\text{VI})$  из загрязненных вод и трансмембранный поток при  $\text{pH } 7,5$

$C_{\text{PP}_{650\text{TR}}}, \text{мг/дм}^3$	$R$	$J_v, \text{мкм/с}$
0	0,75	14,6
0,1	0,99	12,8
0,3	0,999	12,6
30,0	0,99	10,2

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют, что добавление  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  способствует увеличению коэффициента задерживания  $\text{U(VI)}$  мембраной УПМ-20 до максимально возможных значений (0,999) по сравнению с  $\text{PP}_{2530}$ . Это происходит при добавлении  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  с концентрацией 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, тогда как наиболее высокий результат получен при использовании  $\text{PP}_{2530}$  с концентрацией 30 мг/дм<sup>3</sup>. Улучшение может быть связано с тем, что, хотя молекулярная масса  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  существенно меньше таковой  $\text{PP}_{2530}$ ,  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  образует более разветвленные комплексы с анионными формами  $\text{U(VI)}$ , чем  $\text{PP}_{2530}$  с катионными формами  $\text{U(VI)}$ . Это способствует наиболее эффективному задерживанию комплексов  $\text{U(VI)} - \text{PP}_{650\text{TR}}$ . Динамическая мембрана из  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  и его комплексов с  $\text{U(VI)}$  формируется, вероятнее всего, на поверхности мембраны УПМ-20. Трансмембранный поток в проведенных исследованиях (см. табл. 3) уменьшился с 14,6 до 10,2 мкм/с.

Кроме того, было изучено влияние ионной силы растворов, создаваемой  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ , на УФ-извлечение  $\text{U(VI)}$  из загрязненной воды при концентрации  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  0,3 мг/дм<sup>3</sup> и pH 7,5 (табл. 4).

*Таблица 4. Влияние  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  на коэффициент задерживания  $\text{U(VI)}$  из загрязненной воды и трансмембранный поток в присутствии  $\text{PP}_{650\text{TR}}$  при концентрации 0,3 мг/дм<sup>3</sup> и pH 7,5*

NaCl			CaCl <sub>2</sub>		
$C_{\text{NaCl}}$ , М	$R$	$J_v$ , мкм/с	$C_{\text{CaCl}_2}$ , М	$R$	$J_v$ , мкм/с
0	0,999	12,6	0	0,999	12,6
0,01	0,95	12,5	0,01	0,92	12,4
0,1	0,91	12,4	0,02	0,78	12,3
0,2	0,82	11,2	0,2	0,23	11,1

Полученные результаты свидетельствуют, что при увеличении ионной силы раствора происходит ухудшение показателей очистки. Коэффициент задерживания  $\text{U(VI)}$  мембраной УПМ-20 уменьшается с 0,999 до 0,85 в случае добавления  $\text{NaCl}$  и с 0,999 до 0,23 – при добавлении  $\text{CaCl}_2$ . Трансмембранный поток при этом снижается с 12,6 до 11,2 и с 12,6 до 11,1 мкм/с при добавлении соответственно  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$ . Как отмечено выше, ухудшение показателей очистки, вероятно, связано с

явлением концентрационной поляризации и повышением осмотического давления в системе [16].

Исследования по очистке воды от урана проводили с использованием катионного и анионного Праестолов, поскольку U(VI) в растворе в зависимости от pH может находиться как в анионной, так и в катионной формах, в то время как Cr(VI) в растворах содержится исключительно в виде аниона [19, 20]. Поэтому наши последующие исследования были направлены на определение влияния катионного Праестола ПР<sub>650TR</sub> на УФ-очистку вод, содержащих хром. В частности, проведены эксперименты по извлечению Cr(VI) из вод, содержащих хром, при различных концентрациях ПР<sub>650TR</sub>: от 0 до 50 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 5).

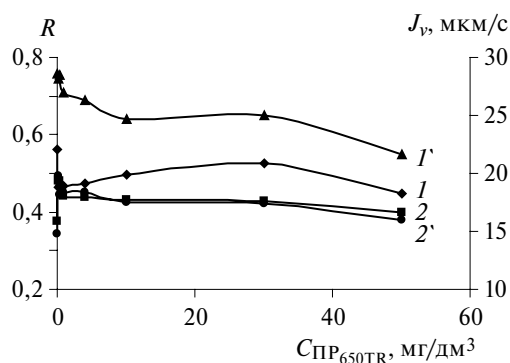


Рис. 5. Зависимость коэффициента задерживания Cr(VI) мембраной УПМ-20 (1, 1') и трансмембранного потока (2, 2') от концентрации ПР<sub>650TR</sub> при pH 5,5 (1, 2) и 7,5 (1', 2').

Из данных указанного рисунка видно, что добавление ПР<sub>650TR</sub> (pH 5,5) приводило к незначительному увеличению коэффициента задерживания Cr(VI) мембраной УПМ-20 (от 0,47 до 0,53). Максимальный коэффициент задерживания получен при концентрации ПР<sub>650TR</sub>, равной 30 мг/дм<sup>3</sup>.

Анализ результатов, полученных при pH 7,5, показал, что в этом случае коэффициент задерживания Cr(VI) выше, чем при pH 5,5. Однако данный показатель уменьшился с 0,76 (в отсутствие ПР<sub>650TR</sub>) до 0,55 (при концентрации ПР<sub>650TR</sub> 50 мг/дм<sup>3</sup>). На трансмембранный поток добавление ПР<sub>650TR</sub> практически не влияло. В обоих случаях (см. рис. 5, кривые 2, 2')  $J_v$  находился на уровне 17 мкм/с. То есть добавление ПР<sub>650TR</sub> в исследуемый раствор, содержащий хром, не способствовало улучшению УФ-процесса.

Также было изучено влияние pH на удаление Cr(VI) при концентрации ПР<sub>650TR</sub> 30 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 6).

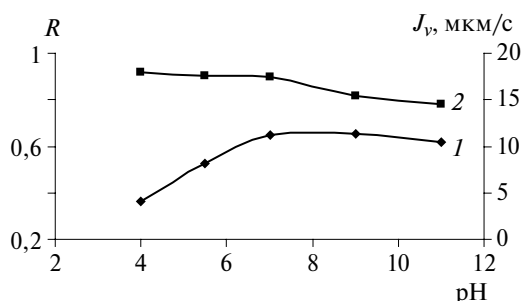


Рис. 6. Зависимость коэффициента задерживания Cr(VI) мембраной УПМ-20 (1) и трансмембранного потока (2) от pH при концентрации ПР<sub>650TR</sub>, равной 30 мг/дм<sup>3</sup>.

На кривой 1 (см. рис. 6) показано изменение коэффициента задерживания Cr(VI) при УФ-очистке воды. Максимальное значение R (0,65) получено при pH 7 – 9. Кривая 2 отражает изменение трансмембранного потока при различных значениях pH. Известно, что в водных растворах хром в зависимости от pH находится в виде различных анионов [20, 21]. В диапазоне pH 1÷5 существуют анионы HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>, при pH > 6 – анионы CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Анионы HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup> задерживаются мембраной УПМ-20 примерно в два раза хуже, чем анионы CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Монотонное снижение трансмембранного потока с 18 до 15 мкм/с при УФ-очистке загрязненной воды в диапазоне pH 4÷11 обусловлено, по-видимому, образованием динамической мембраны вследствие сорбции соединений Cr(VI) на поверхности мембраны УПМ-20 и частично – в ее порах, что и препятствует потоку раствора [15].

Таким образом, добавление в исследуемую систему катионного ПР<sub>650TR</sub> не приводит к улучшению УФ-очистки воды от Cr(VI). Это может быть связано с тем, что положительного заряда ПР<sub>650TR</sub> (структурная формула II) недостаточно для прочного связывания Cr(VI), находящегося в виде анионов CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> и/или HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

**Выводы.** Определено, что оптимальными условиями для ультрафильтрационной очистки вод, содержащих уран, являются: концентрация анионного Праестола ПР<sub>2530</sub>, равная 30 мг/дм<sup>3</sup>, и pH раствора 4 – 9. Коэффициент задерживания U(VI) УФ-мембраной УПМ-20 достигает значения 0,99. Показано, что добавление катионного Праестола

ПР<sub>650TR</sub> способствует увеличению коэффициента задерживания U(VI) мембраной УПМ-20 по сравнению с анионным Праестолом ПР<sub>2530</sub> до максимально возможных величин (0,999) в области значений рН воды, характерных для природных вод. Добавление ПР<sub>2530</sub> в очищаемую воду практически не оказывает влияния на эффективность НФ-очистки вод, содержащих уран. При увеличении ионной силы раствора происходит ухудшение показателей очистки.

Установлено, что для УФ-очистки растворов, содержащих хромат-анионы, использование катионного Праестола ПР<sub>650TR</sub> является неэффективным.

**Резюме.** Досліджено вплив водорозчинних високомолекулярних поліелектролітів на ультра- та нанофільтраційний процеси очистки вод, забруднених U(VI) та Cr(VI). Як такі сполуки використовували похідні поліакриламідів катіонний та аніонний Праестоли. Встановлено залежність видалення U(VI) та Cr(VI) від рН та від концентрації Праестолу. Показано, що при застосуванні Праестолу максимальний коефіцієнт затримування U(VI) як ультра- так і нанофільтраційною мембранами становив 0,999; максимальний коефіцієнт затримування Cr(VI) ультрафільтраційною мембраною – 0,65.

*B.P. Iatsyk, L.Yu. Yurlova, G.N. Pshinko, A.P. Kryvoruchko*

## **DERIVATIVES OF POLYACRYLAMIDE AS REAGENTS FOR WATER PURIFICATION FROM U(VI) AND Cr(VI)**

### Summary

The effect of water-soluble macromolecular polyelectrolytes on ultra- and nanofiltration processes of purification of water contaminated by U(VI) and Cr(VI) was investigated. As such compounds were used polyacrylamide derivatives cationic and anionic Praestol. The dependence of pH and the Praestol concentration on U(VI) and Cr(VI) removal was established. It is shown that at the using of Praestol the maximum retention coefficient of U(VI) by ultrafiltration and nanofiltration membranes was 0.999, the maximum retention coefficient of Cr(VI) by ultrafiltration membrane – 0.65.

## Список использованной литературы

- [1] *Кульский Л.А.* Теоретические основы и технология кондиционирования воды. – К.: Наук. думка, 1983. – 528 с.
- [2] *Экологические аспекты современных технологий охраны водной среды* / Под ред. В.В. Гончарука. – К.: Наук. думка, 2005. – 400 с.
- [3] *Первов А.Г.* Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. – М.: Изд-во ассоциации строит. вузов, 2009. – 232 с.
- [4] *Kryvoruchko A.P., Yurlova L.Yu., Atamanenko I.D. et al.* // Desalination. – 2004. – **162**. – P. 229 – 236.
- [5] *Jianxian Z., Hongqi Ye., Zhongyu H.* // J. Hazard. Materials. – 2009. – **161**. – P. 1491–1498.
- [6] *Canizares P., Peres A., Llanos J., Rubio G.* // Desalination. – 2008. – **223**. – P. 229–237.
- [7] *Запольский А.К., Баран А.А.* Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
- [8] *Надеждин И.Н.* Дис. .... канд. хим. наук. – Казань, 2008. – 148 с.
- [9] *Пахоль Ю.О.* // Материалы VIII Междунар. науч. конф. аспирантов и студентов "Охрана окруж. среды и рац. использование природ. ресурсов" (Донецк, 14 – 16 апреля 2009 г.). – Донецк, ДонНТУ, 2009. – С. 158.
- [10] *Сайт ООО "Водоочистка".* Комплексные системы водоочистки. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ochistka-vodi.ru/flokuliant-praestol.html>
- [11] *ГОСТ 12.1.007-76.* Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 01.01.1977.
- [12] *Немодрук А.А., Глухова Л.П.* // Журн. аналит. химии. – 1963. – **18**, № 1. – С. 93 – 97.
- [13] *Марченко З.* Фотометрическое определение элементов. – М.: Мир, 1971. – 502 с.
- [14] *Yurlova L., Kryvoruchko A., Kornilovich B.* // Desalination. – 2002. – **144**. – P. 255 – 260.
- [15] *Yurlova L.Yu., Kryvoruchko A.P., Dolenko S.O., Romaniukina I.Yu.* // J. Water Chem. and Technol. – 2013. – **35**, N 1. – P. 8 – 14.
- [16] *Tsapiuk E.A.* // J. Membrane Sci. – 1997. – **124**. – P. 107–117.

- [17] *Брык М.Т.* Енциклопедія мембран: У 2 т. – К.: Вид. дім "Києво-Могилян. акад.", 2005. – Т. 2. – 684 с.
- [18] *Mavrov V.V., Petrova I., Davarsky K., Manolov S.* // Desalination. – 1991. – **83**. – P. 289–300.
- [19] *Цапюк Е.А., Манк В.В.* // Коллоид. журн. – 1987. – **49**, №2. – С. 397–401.
- [20] *Лаврухина А.Н., Юкина Л.В.* Аналитическая химия хрома. – М.: Наука, 1979. – 218 с.
- [21] *Аникин В.Ю., Басаргин Н.Н., Косолапова Н.И. и др.* // Завод. лаб. "Диагностика материалов". – 2008. – **74**, № 6. – С. 15–19.

Поступила в редакцию 03.04.2013 г.