

Инкрементальная геометрически нелинейная осесимметричная конечноэлементная модель формоизменения толстых оболочек из листовых металлов под действием жестких инструментов

д.т.н. проф. Сухомлинов Л.Г., к.т.н. доц. Михайлова В.Л.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23, tm@mami.ru

Аннотация. На основе треугольного элемента с линейным законом распределения перемещений строится инкрементальная осесимметричная жесткопластическая конечноэлементная модель формоизменения толстой оболочки из листового металла под действием жестких инструментов. На каждом шаге нагружения учитываются нелинейности, связанные с изменением конфигурации оболочки и ее контактного состояния. В качестве примеров рассматриваются процессы вытяжки толстостенной оболочки через коническую и цилиндрическую матрицы.

Ключевые слова: осесимметричная жесткопластическая конечноэлементная модель, вытяжка толстой оболочки из листового металла

В работах [1, 2] представлены осесимметричная и неосесимметричная безмоментные конечноэлементные модели пластического формоизменения тонких оболочек в процессах листовой штамповки, вычислительная надежность которых обеспечивается использованием неявной инкрементальной схемы решения, учитывающей изменение геометрии оболочки на шаге нагружения. В настоящей статье аналогичный подход используется при построении вычислительной модели, ориентированной на решение задач пластического формоизменения толстостенных оболочек из листовых металлов.

Полагаем, что в исходном недеформированном состоянии моделируемая оболочка представляет собой круговую заготовку из однородного изотропного листового металла. Упругими деформациями на фоне больших пластических деформаций (характерных для рассматриваемых процессов формоизменения) пренебрегаем, считая материал оболочки жесткопластическим. В качестве физических соотношений принимаем вариант теории течения (ассоциированный с квадратичным критерием Мизеса) применительно к случаю изотропного материала с изотропным упрочнением. Считаем, что взаимодействие оболочки с инструментом осуществляется в соответствии с кулоновским законом трения.

Дискретная модель толстой оболочки как тела вращения образуется путем разбиения прямоугольной области, занимаемой осевым сечением оболочки в исходном недеформированном состоянии, на треугольные элементы с принятием линейного закона изменения перемещений внутри каждого треугольника. Подобное разбиение осуществляется следующим образом. Проводим через указанную прямоугольную область набор прямых, параллельных ее сторонам. В результате приходим к разбиению этой области на элементарные прямоугольники. Проводим затем диагонали в каждом из элементарных прямоугольников, разбивая его тем самым на четыре соответствующих треугольника. Полученная таким образом сетка из треугольников, покрывающая рассматриваемую прямоугольную область, и используется при численном моделировании процессов пластического формоизменения толстых оболочек вращения. Отметим, что в процессе деформирования исследуемого тела вращения элементарные прямоугольники введенной в рассмотрение сетки трансформируются в четырехугольники (состоящие из четырех треугольников).

Процесс формоизменения образованной в результате описанного разбиения осесимметричной модели, состоящей из элементарных колец треугольного сечения, рассматриваем как пошаговый, при котором переход из известного состояния в момент времени t в новое состояние, относящееся к моменту времени $t + \Delta t$, осуществляется с малыми приращениями деформаций. На указанном малом временном интервале Δt (шаге нагружения)

формулировку задачи для принятой дискретной модели тела вращения выполняем в терминах узловых перемещений (перемещений вершин треугольных элементов) с использованием цилиндрической системы координат (x, r, φ) . При этом для указанных узловых перемещений в осевом (x) и радиальном (r) направлении используем обозначения u_x^i и u_r^i ($i = 1, 2, \dots, N$), где N - общее количество узлов в дискретной модели.

Вводим обозначения $\varepsilon_x, \varepsilon_r, \frac{1}{2}\varepsilon_{xr}, \varepsilon_\varphi$ для соответствующих рассматриваемому осесимметричному случаю компонент тензора конечных деформаций Грина-Лагранжа, вычисляемых относительно конфигурации модели в начале шага нагружения. В рамках принятого предположения о малости приращений деформаций на шаге параметры $\varepsilon_x, \varepsilon_r, \varepsilon_{xr}, \varepsilon_\varphi$ для каждого элемента с точностью до пренебрежения этими параметрами по сравнению с единицей можно рассматривать как малые относительные удлинения и сдвиги [3]. Используя известные соотношения нелинейной теории упругости [3], связывающие квадратичной зависимостью параметры $\varepsilon_x, \varepsilon_r, \varepsilon_{xr}$ с частными производными перемещений u_x, u_r по переменным x, r , получаем для каждого элемента модели квадратичного типа выражения его деформационных характеристик $\varepsilon_x, \varepsilon_r, \varepsilon_{xr}$ через узловые перемещения u_x^i, u_r^i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Малое относительное удлинение ε_φ на шаге нагружения окружного материального волокна в середине элемента определяем по схеме

$$\varepsilon_\varphi = \tilde{u}_r / \tilde{r}, \quad (1)$$

где величины \tilde{u}_r и \tilde{r} , относящиеся к середине элемента, вычисляются с использованием соответствующих узловых значений u_r^i и r_i (в вершинах элемента) по схеме среднего арифметического.

Считаем, что шаг нагружения настолько мал, что бесконечно малые удлинения и сдвиги в уравнениях теории течения для изотропного материала с изотропным упрочнением [4] можно заменить на соответствующие малые, но конечные деформации на шаге. В результате приходим к следующим соотношениям, связывающим напряжения $\sigma_x, \sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_{xr}$ с деформациями $\varepsilon_x, \varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_{xr}$ в элементах дискретной модели тела вращения на шаге нагружения:

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\varepsilon} \varepsilon_x + \sigma_v, \quad (x \leftrightarrow r), \quad \sigma_{xr} = \frac{1}{3} \frac{\sigma}{\varepsilon} \varepsilon_{xr}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_\varphi^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_{xr}^2 \right)}, \quad (3)$$

$$\sigma_v = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_r + \sigma_\varphi), \quad (4)$$

$$\sigma = \Phi(\bar{\varepsilon}^*), \quad \bar{\varepsilon}^* = \bar{\varepsilon} + \varepsilon. \quad (5)$$

Здесь σ - интенсивность напряжений; ε - интенсивность приращений деформаций; σ_v - напряжение всестороннего растяжения-сжатия (получаемое осреднением по треугольным элементам, входящим в общий для них четырехугольный элемент); $\bar{\varepsilon}$ и $\bar{\varepsilon}^*$ - величины накопленной деформации в моменты времени t и $t + \Delta t$; $\Phi(\bar{\varepsilon})$ - экспериментально устанавливаемая функция упрочнения материала.

Условие несжимаемости материала в состоянии пластического течения включаем в

вычислительную модель по методу штрафных функций, а именно считаем, что связь между указанным напряжением всестороннего растяжения-сжатия и относительным изменением объема элемента $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_r + \varepsilon_\varphi$ на шаге (также получаемым осреднением по треугольным элементам, входящим в общий для них четырехугольный элемент) имеет вид

$$\sigma_v = K\theta, \quad (6)$$

где K - фиктивный модуль объемного растяжения-сжатия, подбираемый настолько большой величины, чтобы обеспечить условия, близкие к несжимаемости (в рамках упомянутого четырехугольного элемента).

Таким образом, в модели появляется методический параметр K , диапазон изменения которого устанавливается численным экспериментом.

Отметим, что указанная процедура осреднения объемной деформации по треугольным элементам, составляющим соответствующий четырехугольник, обеспечивает, как показано в работе [5], устойчивый вычислительный процесс при моделировании несжимаемого материала путем введения фиктивного модуля объемного растяжения-сжатия.

Принимая во внимание тот факт, что деформации в элементе являются явными функциями перемещений, напряжения, непосредственно определяемые через деформации на шаге согласно физическим соотношениям (2), с учетом связей (3), (5), (6) могут также рассматриваться как явные функции узловых перемещений на шаге нагружения.

Считаем, что все нагрузки, действующие на рассматриваемую модель тела вращения, сведены к обобщенным узловым силам $2\pi F_x^i$ и $2\pi F_r^i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) в осевом и радиальном направлениях. Исходим из принципа возможных перемещений, утверждающего, что в состоянии равновесия работа приложенных к деформируемому телу сил на вариациях возможных перемещений равна работе напряжений на соответствующих вариациях деформаций. В результате для рассматриваемой модели тела вращения на шаге нагружения получаем вариационное уравнение вида

$$\begin{aligned} 2\pi \sum (\sigma_x \delta\varepsilon_x + \sigma_r \delta\varepsilon_r + \sigma_\varphi \delta\varepsilon_\varphi + \sigma_{xr} \delta\varepsilon_{xr}) \tilde{r} \Delta = \\ = 2\pi \sum_{i=1}^N (F_x^i \delta u_x^i + F_r^i \delta u_r^i). \end{aligned} \quad (7)$$

Суммирование в левой части уравнения (7) осуществляется по всем элементам модели. Величина Δ представляет собой площадь треугольного элемента в начале шага нагружения.

С использованием представленных физических и геометрических соотношений вариационное уравнение (7) формулируется исключительно в терминах узловых перемещений. Приравнявая коэффициенты при одноименных вариациях узловых перемещений в левой и правой части такого уравнения, получаем для i -ого узла дискретной модели оболочки на шаге нагружения уравнения равновесия вида:

$$\begin{aligned} L_x^i(u_x^j, u_r^j) &= F_x^i, \\ L_r^i(u_x^j, u_r^j) &= F_r^i, \end{aligned} \quad (8)$$

где L_x^i , L_r^i - нелинейные алгебраические операторы, отражающие геометрическую и физическую нелинейность рассматриваемой задачи на шаге нагружения.

Остается теперь обратить внимание на то, что с получением уравнений равновесия для рассматриваемой модели в виде (8) мы приходим к ситуации, аналогичной той, которая имеет место в случае предназначенной для исследования процессов листовой штамповки осесимметричной безмоментной геометрически нелинейной жесткопластической модели [2, 6]. Поэтому все дальнейшие действия по формулировке соответствующей контактной задачи для рассматриваемой модели и построению итерационного процесса ее решения осуществляются аналогично тому, как это сделано при построении указанной безмоментной модели.

Перейдем теперь к анализу процессов формоизменения толстых оболочек под действием жестких инструментов с использованием описанной вычислительной модели. Результаты расчетов будем сравнивать с результатами экспериментов по вытяжке толстых оболочек из листовой стали 3кп толщиной $h_0 = 5\text{ мм}$, выполненных Е.Н. Шмелевым в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

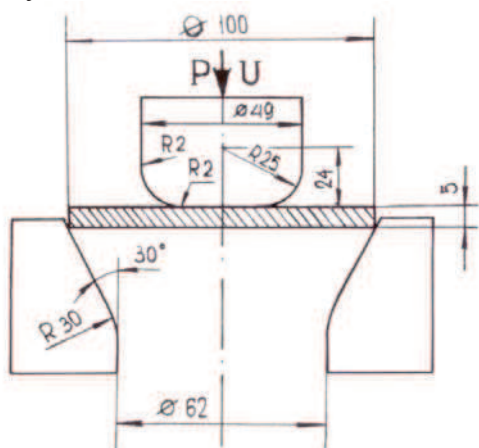


Рисунок 1. Схема вытяжки оболочки через коническую матрицу

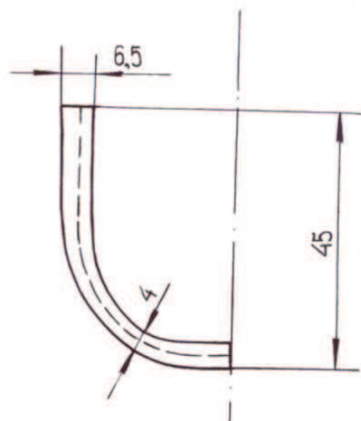


Рисунок 2. Полученная численным моделированием форма оболочки при вытяжке через коническую матрицу

Рассмотрим процесс вытяжки оболочки через коническую матрицу под действием цилиндрического пуансона со скругленной кромкой. Схема вытяжки с указанием размеров инструментов и листовой заготовки представлена на рисунке 1. Характеристика упрочнения листового материала задана зависимостью $\sigma = A\bar{\epsilon}^n$, где $A = 637\text{ МПа}$, $n = 0,245$. Коэффициент трения на пуансоне оценен величиной $\mu = 0,25$; на матрице - $\mu = 0,2$.

Форма готовой оболочки, полученная на основе численного моделирования процесса вытяжки через коническую матрицу, показана на рисунке 2. Наибольшее утонение оболочки (наиболее опасное на разрыв сечение) имеет место в зоне контакта со скругленной кромкой пуансона.

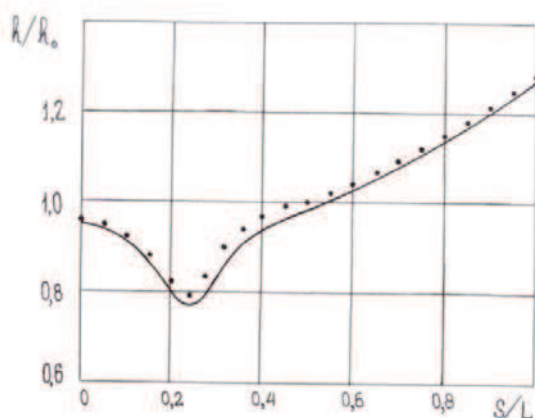


Рисунок 3. Распределение толщины вдоль срединного меридиана оболочки, полученной вытяжкой через коническую матрицу

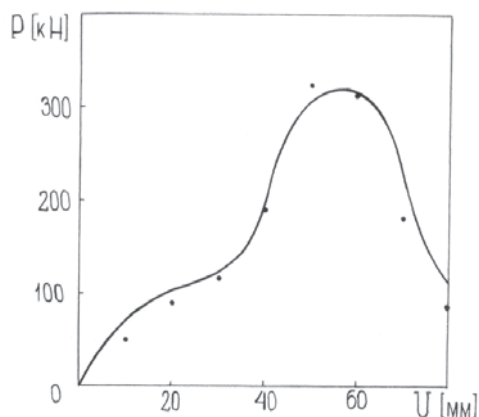


Рисунок 4. График зависимости силы на пуансоне от его перемещения в процессе вытяжки оболочки через коническую матрицу

На рисунке 3 представлены результаты расчета (сплошная кривая) и эксперимента (точки) по распределению толщины такой оболочки вдоль ее срединного меридиана (здесь L - полная длина срединного меридиана оболочки). Видно, что положение ослабленного

сечения и значение толщины в нем, предсказанные численным моделированием, хорошо согласуются с экспериментом.

На рисунке 4 представлен полученный расчетным путем (сплошная кривая) и экспериментом (точки) график зависимости силы P на пуансоне от его перемещения U в процессе вытяжки оболочки через коническую матрицу. Падение силовой характеристики процесса при $U \geq 60$ мм в данном случае (в условиях отсутствия локализации деформации) означает, что процесс формообразования оболочки вступает в завершающую стадию, когда заканчивается формирование цилиндрического участка оболочки, и она сможет свободно проходить через отверстие матрицы. Здесь также наблюдается хорошее согласование расчета с экспериментом.

Рассмотрим теперь процесс вытяжки оболочки из той же листовой стали, что и выше, но уже с использованием цилиндрической матрицы. Этот случай соответствует ситуации, когда угол конуса на схеме, представленной на рисунке 1, вместо 30° принимает значение 90° . Таким образом, вместо конического участка используемая матрица имеет плоскую часть, на которой располагается исходная круговая заготовка.

Диаметр матрицы и радиус скругления ее рабочей кромки имеют величины 62 мм и 15 мм, соответственно. Аналогичные характеристики пуансона имеют значения 49 мм и 10 мм, соответственно. Диаметр заготовки составляет величину 110 мм.

Эксперимент показал, что при перемещении пуансона $U = 32$ мм происходит разрыв вытягиваемой оболочки в зоне контакта со скругленной кромкой пуансона (рисунок 5). Проследим, каким образом подобную ситуацию может предсказывать используемая вычислительная модель.



Рисунок 5. Случай разрыва толстой оболочки при вытяжке через цилиндрическую матрицу

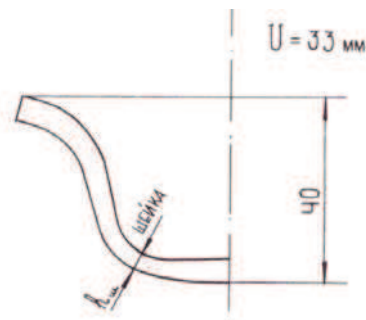


Рисунок 6. Форма оболочки, полученная численным моделированием процесса вытяжки через цилиндрическую матрицу

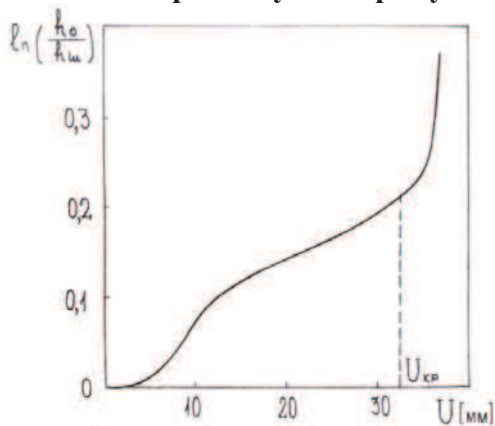


Рисунок 7. График зависимости толщины оболочки в "шейке" от перемещения пуансона при вытяжке через цилиндрическую матрицу

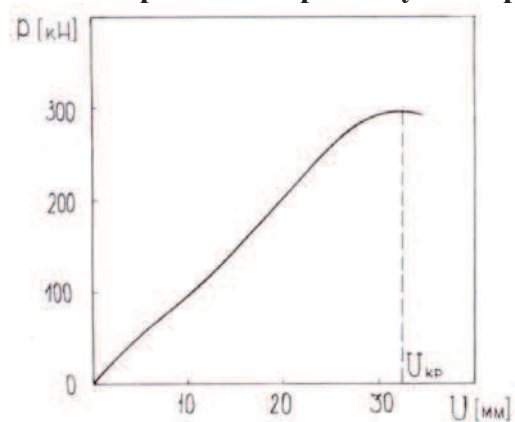


Рисунок 8. График зависимости силы на пуансоне от его перемещения при вытяжке оболочки через цилиндрическую матрицу

На рисунке 6 приведена полученная расчетным путем форма вытягиваемой оболочки при перемещении пуансона $U = 33 \text{ мм}$. Здесь отмечено сечение с наибольшим утонением (т.е. место возможного шейкообразования).

На рисунках 7 и 8 приведены графики зависимостей толщины $h_{ш}$ оболочки в "шейке" и силы P на пуансоне от перемещения U пуансона. Видно, что, начиная с некоторого значения перемещения пуансона, происходит катастрофическое утонение в "шейке" (характерный признак локализации деформации). При значении перемещения пуансона $U_{кр} = 32,5 \text{ мм}$ нагрузка на пуансоне начинает падать (потеря несущей способности оболочки вследствие локализации деформации). Это значение перемещения пуансона и может быть принято за критическое, при котором должен следовать разрыв оболочки. Таким образом, ситуация с разрывом толстой оболочки в процессе вытяжки также хорошо предсказывается с помощью представленной дискретной модели.

Выводы

1. Представлена инкрементальная конечноэлементная модель пластического формоизменения толстой оболочки вращения под действием жестких инструментов. При построении модели использован плоский треугольный элемент с линейным законом распределения перемещений. На каждом шаге нагружения учтены нелинейности, связанные с изменениями конфигурации оболочки и состояния ее контакта с инструментами.
2. С применением указанной модели выполнены исследования процессов вытяжки толстой оболочки через коническую и цилиндрическую матрицы. Дано сравнение результатов расчетов с экспериментом.

Литература

1. Сухомлинов Л.Г., Петров В.К. Инкрементальная геометрически нелинейная безмоментная конечноэлементная модель пластического формоизменения листовых металлов под действием жестких инструментов // Известия МГТУ «МАМИ». №2(8). 2009. С. 241–247.
2. Петров В.К., Михайлова В.Л., Сухомлинов Л.Г. // Известия МГТУ «МАМИ». №2(14). 2012, т.2. С. 150–158.
3. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М.- Л.: Гостехиздат, 1948. 212 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
5. Nagtegaal J.C., Parks D.M., Rice J.R. On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range // Comput. Meth. Appl. Mech. Engng. 1974. V. 4, N.2. P.153-177.
6. Sukhomlinov L.G., Engelsberg V.K., Davydov V.N. A finite element membrane model for the analysis of axisymmetric sheet metal forming processes // Int. J. Mech. Sci. 1992. V. 34. N 3. P. 179-193.

Современные сорбенты для очистки сточных вод от молибдат-ионов

Терехова М.В., д.х.н. проф. Горичев И.Г., к.х.н. Русакова С.М., к.х.н. доц. Артамонова И.В.

Университет машиностроения
8-926-664-30-40, dolgaleva_inna@mail.ru

Аннотация. Исследованы адсорбционные способности отходов алюмосиликатного производства по отношению к молибдат-ионам. Предложен кислотный способ активации красного шлама и алюмосиликатного компонента (АСК), позволяющий увеличить их адсорбционные свойства.

Ключевые слова: красный шлам, алюмосиликатный компонент, адсорбция, молибдат-ионы, изотерма Ленгмюра.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013годы» (контракты №14.740.11.1095, 16.740.11.0679) и аналитической ведомственной целевой программы (шифр заявки № 3.5258.2011).

Введение

При производстве глинозема по методу Байера в качестве побочного продукта образуется красный бокситовый шлам – мелкодисперсное вещество.

Из-за отсутствия эффективных технологий переработки основная масса красных шламов не используется и складывается в специальных шламохранилищах. В настоящее время количество депонированного красного шлама (из-за отсутствия переработки) исчисляется сотнями миллионов тонн. Ежегодный прирост только по одному из заводов составляет порядка 800 тысяч тонн, потому вопрос его переработки очень актуален на сегодняшний день и требует как можно скорейшего решения.

Утилизация и переработка накопленных в избытке подобных отходов производства является важными научно-техническими задачами, так как красный шлам оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

В работе исследуется возможность красного шлама адсорбировать молибдаты из водных растворов.

Цель работы:

- Изучить адсорбционную способность красного шлама и алюмосиликатного компонента по отношению к молибдат-ионам.
- Увеличить адсорбционную способность красного шлама и АСК путем активации их соляной кислотой.
- Исследовать влияние рН раствора электролита на эффективность адсорбции молибдат-ионов.

Методика эксперимента

Красный шлам и алюмосиликатный компонент, используемые в данном исследовании, были произведены на Уральском Алюминиевом заводе (УАЗ). Этот неактивированный шлам без каких-либо изменений использовался в эксперименте.

Активацию красного шлама и алюмосиликатного компонента проводили путем промывания раствором соляной кислоты с концентрацией 0,1 моль/л, при этом уровень рН промывных вод снизился примерно с 12 до 8.

Адсорбцию молибдат-ионов проводили при начальной концентрации молибдена в растворе от 0,0015 до 0,005 моль/л при постоянной концентрации фонового электролита KCl 0,1 моль/л. Масса адсорбента во всех случаях была равной 1грамм, и время контакта его с раствором молибдата составляло 1 час при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке со скоростью вращения 350 об/мин.

Для определения концентрации молибдат-ионов в растворе применяли роданидный ме-

тод, измерения оптической плотности испытуемых растворов по отношению к нулевому раствору проводили на спектрофотометре СФ-56 по методике[1].

Величина адсорбции определялась по разности начальной и конечной концентрации ионов, отнесенной к единице массы адсорбента и вычислялась по формуле:

$$\Gamma = \frac{C_{(нач.)} - C_{(кон.)}}{m},$$

где: Γ - величина адсорбции, C – концентрация молибдат-ионов в растворе, m – масса адсорбента.

Результаты и их обсуждения

Сравнение способности красного шлама и аморфных оксидов алюминия и железа адсорбировать молибдат-ионы

В литературе накоплен некоторый экспериментальный материал по данной теме [2-4]. В данной работе использовались результаты исследований по адсорбции анионов на оксидах алюминия и железа, проведенные зарубежными авторами [2, 3]. Адсорбция молибдат-ионов на красном шламе выполнена по методике, использованной авторами в своих трудах [2].

Зависимость адсорбции от рН среды на красном шламе и оксидах железа и алюминия для молибдат-ионов представлены на рисунках 1 и 2. При анализе данных рисунков можно выделить следующие особенности:

- С увеличением значения рН адсорбция молибдат-ионов уменьшается.
- При адсорбции молибдат-ионов на красном шламе наблюдается уменьшение адсорбции при более высоких рН.
- Адсорбция легко протекает в области рН от 4 до 8, где поверхность оксидов алюминия и железа имеет отрицательный заряд.
- Кривая адсорбции молибдат-ионов на красном шламе, как и кривая адсорбции на аморфном оксиде алюминия, имеет похожую скачкообразную форму.
- Скачок величины адсорбции наблюдается при рН = 4-5 для красного шлама и рН = 7-8 для оксида алюминия. Это связано с изменением рН_{тнз} оксидов красного шлама.

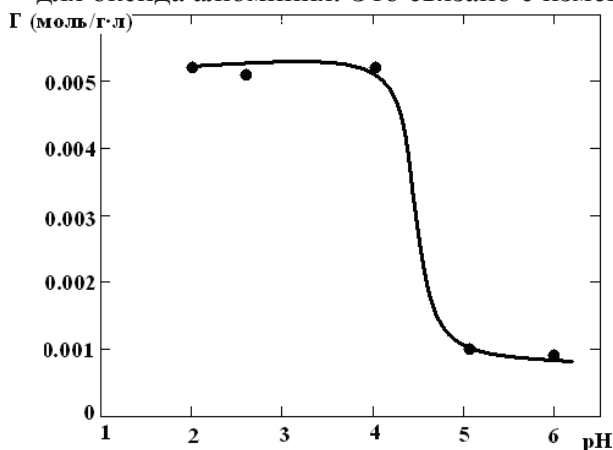


Рисунок 1. Зависимость адсорбции молибдат-ионов на красном шламе от рН, $C_{нач.}=1,0$ ммоль/л

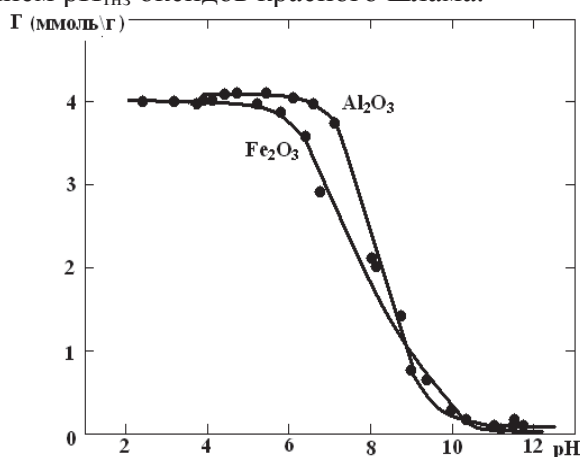


Рисунок 2. Зависимость адсорбции молибдат-ионов на аморфных оксидах железа и алюминия, $C_{нач.}=1,0$ ммоль/л

Данные исследования позволяют сделать вывод, что при адсорбции молибдат-ионов на красном шламе в качестве основного сорбента выступает оксид алюминия, который содержится в его составе.

Сравнение способности неактивированного, активированного красного шлама и алюмосиликатного компонента адсорбировать молибдат-ионы

В данной работе экспериментально изучена способность красного шлама и АСК к сорбции молибдат-ионов из водных растворов.

Из рисунка 3 видно, что зависимость величины адсорбции от рН как для неактивиро-

ванного красного шлама, так и для активированного кислотой имеет аналогичную тенденцию: чем выше рН, тем ниже величина адсорбции. Значительное увеличение адсорбционной мощности достигается при рН от 2 до 4.

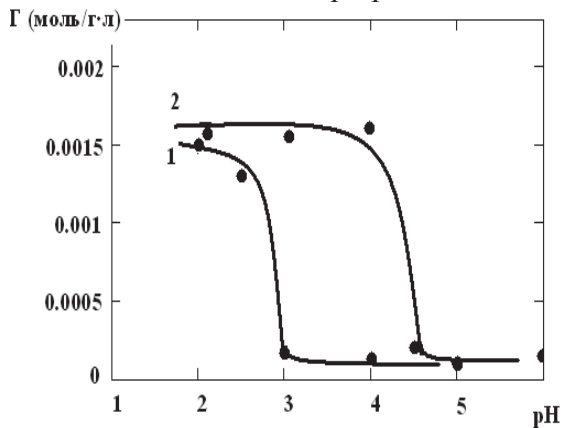


Рисунок 3. Зависимость адсорбции молибдат-ионов на неактивированном (1) и активированном кислотой HCl (2) красном шламе от рН, $C_{нач.} = 0,004$ моль/л

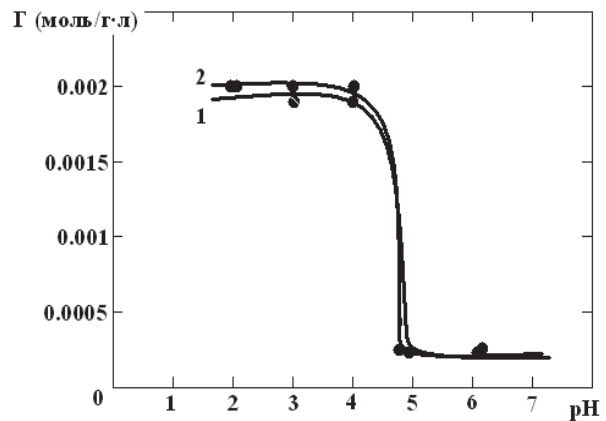


Рисунок 4. Зависимость адсорбции молибдат-ионов на активированном красном шламе (1) и активированном алюмосиликатном компоненте (2) от рН, $C_{нач.} = 0,005$ моль/л

Из экспериментальных наблюдений становится ясно, что неактивированный шлам при очень низких значениях рН обладает такой же способностью адсорбировать молибдат-ионы, как и обработанные кислотой образцы и могут использоваться как сорбенты.

Также в данной работе была изучена адсорбция молибдат-ионов на активированном красном шламе и активированном алюмосиликатном компоненте. Из данных рисунка 4 видно, что адсорбционное поведение и шлама, и АСК в одинаковых условиях практически идентично. Так и в первом, и во втором случаях при рН = 4 наблюдается скачкообразное увеличение адсорбции до значения, равного 0,002 моль/г·л.

Зависимость адсорбции молибдат-ионов от значения рН

В ходе эксперимента была изучена адсорбция молибдат-ионов на активированном красном шламе при различных значениях рН. Ясно, что адсорбционная способность красного шлама имеет тесные отношения с величиной рН. Полученные результаты представлены на рисунке 5.

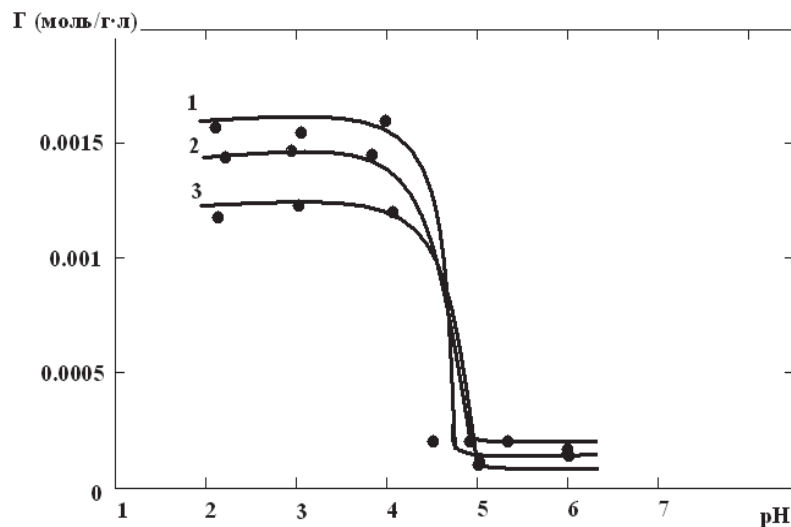


Рисунок 5. Зависимость адсорбции молибдат-ионов на красном шламе от рН при разных начальных концентрациях раствора: 1-0,004; 2-0,002; 3-0,0015 моль/л

Очевидно, что сорбция молибдат-ионов наиболее эффективна в кислой среде и с уве-

личением рН она уменьшается. Так при значении рН выше 5 удаление анионов из раствора происходит незначительно.

Из графика также видно, что оптимальное значение рН для максимальной адсорбции находится в области 3-4. Предельная адсорбция не зависит от рН и при его значении свыше 3 практически не изменяется.

Выводы

С увеличением рН адсорбция молибдат-ионов уменьшается.

Оптимальное значение рН для максимальной адсорбции – 3-4.

Предельное значение адсорбции не зависит от рН.

Для описания адсорбционных закономерностей применима кислотно-основная модель.

Адсорбция молибдат-ионов на красном шламе происходит за счет входящего в его состав оксида алюминия.

Литература

1. Марченко З. Фотометрическое определение элементов. Пер. с польск. под ред. Ю.А. Золотова. - М. – Мир - 1971. 502 с.
2. Sabine Goldberg, Cliff T. Johnston, Donald L. Suarez, Scott M. Lesch. Mechanism of Molybdenum Adsorption on Soils and Soil Minerals Evaluated Using Vibrational Spectroscopy and Surface Complexation Modeling. - *Developments in Earth & Environmental Sciences*, 7. – 2008
3. Bruce A. Manning, S. Goldberg. Modeling Competitive Adsorption of Arsenate with Phosphate and Molybdate on Oxide Minerals. - *Soil Science Society of America Journal*. - 1996
4. Sara J. Palmer, Mitchell Nothling, Kathleen H. Bakon, Ray L. Frost. Thermally activated seawater neutralised red mud used for the removal of arsenate, vanadate and molybdate from aqueous solutions. - *Journal of Colloid and Interface Science* 342 - 2010 P. 147–154