

## Ячеечная модель пористого заряженного слоя: вычисление кинетических коэффициентов матрицы Онзагера<sup>1</sup>

Филиппов А.Н.

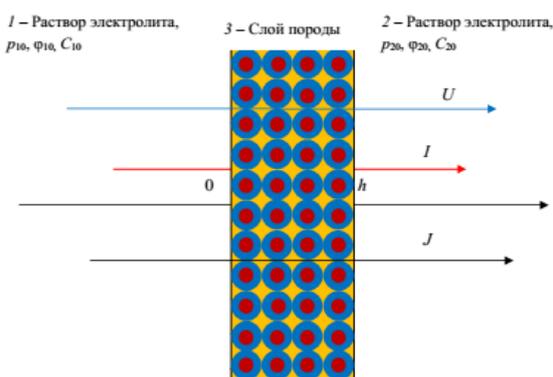
Губкинский университет, Москва

На основе ячейечного метода, разработанного Дж. Хаппелем, и термодинамики необратимых процессов (подход Онзагера) предложен новый способ вычисления плотности потоков растворителя –  $U$ , растворенного вещества –  $J$  и электрического тока –  $I$ , текущих через заряженный пористый слой (мембрану) при одновременном действии внешних градиентов давления  $p$ , химического  $\mu$  (концентрации электролита  $C$ ) и электрического потенциала  $\varphi$ . Показано, что с ростом равновесной концентрации электролита растет и суммарная проницаемость пористой структуры как за счет барофильтрационного, так и за счет электроосмотического переноса растворителя.

В работе [1] была построена ячейечная модель пористого слоя, состоящего из пористых заряженных частиц-шаров одинакового радиуса, поставлена и решена в общем виде задача нахождения кинетических коэффициентов  $L_{ij}$  матрицы Онзагера, а также впервые получена точная алгебраическая формула для гидродинамической проницаемости  $L_{11}$  заряженного слоя. В работе [2] в рамках термодинамики неравновесных процессов, на основе ранее предложенной автором ячейечной модели [1], вычислены электроосмотическая проницаемость  $L_{12}$  и удельная электропроводность  $L_{22}$  заряженного слоя, рассматриваемые как кинетические коэффициенты матрицы Онзагера. В данной работе пользуемся результатами упомянутых исследований, а также новыми формулами, полученными для интегральной диффузионной проницаемости  $L_{33}$ , электродиффузионного  $L_{23}$  и обратноосмотического  $L_{13}$  коэффициентов заряженного пористого слоя и применительно к расчету переноса растворителя (воды), электролита (соль, кислота) и электрического тока через заряженный пористый слой (пласт) нефтеносной породы, находящийся в равновесии с водным раствором бинарного 1:1 электролита. Все частицы в слое окружены жидкой оболочкой. Схема процесса переноса показана на рисунке.

Здесь  $h$  – толщина пористого слоя, индексы

«1» и «2» указывают на левую и правую стороны слоя (пласта), которые контактируют с равновесными растворами 1:1 электролита.



Ячейечная модель была успешно верифицирована с привлечением экспериментальных данных по электропроводности и электроосмотической проницаемости водного раствора соляной кислоты через исходную и модифицированную нанотрубками галлузита и наночастицами платины и железа катионообменную мембрану МФ-4СК [3].

Таким образом, линейные соотношения Онзагера [1] позволяют рассчитать плотности потоков растворителя (линейную скорость  $U$ ), соли  $J$  и электрического тока  $I$  при любых значениях градиентов давления, концентрации и электрического потенциала. А это означает, что можно регулировать указанные потоки, проходящие через пласт, меняя внешнее электрическое поле при постоянных градиентах давления и концентрации электролита.

### Список литературы:

- [1] Filippov A.N. Cell model of ion-exchange membrane. Hydrodynamic permeability // Colloid J. 2018. Vol. 80, No. 6. P. 716–727.
- [2] Filippov A.N. Cell model of ion-exchange membrane. Electroconductivity and electroosmotic permeability // Colloid J. 2018. Vol. 80, No. 6. P. 728–738.
- [3] Filippov A.N., Shkirkaya S.A. Verification of the cell (heterogeneous) model of an ion-exchange membrane and its comparison with the homogeneous model // Colloid J. 2019. Vol. 81, No. 5. P. 597–606.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ – грант №20-08-00661