

УДК 622.5:556.33(013)

Д.В. Рудаков, д-р техн. наук, проф.,
В.И. Тимошук, канд. техн. наук, доц.,
Т.И. Перкова, Е.А. Шерстюк

Государственное высшее учебное заведение
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,
Украина, e-mail: dmi3rud@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОГЕННО-НАГРУЖЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КРИВОРОЖСКОГО БАССЕЙНА

D.V. Rudakov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.I. Timoshchuk, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
T.I. Perkova, Ye.A. Sherstyuk

State Higher Educational Institution "National Mining University",
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: dmi3rud@mail.ru

IDENTIFICATION OF A 3D GROUND WATER FLOW MODEL FOR AN AREA CHARGED BY MINING INDUSTRY IN THE CENTRAL PART OF THE KRYVYI RIG IRON ORE BASIN

Разработана численная модель, учитывающая неоднородность гидрогеологических параметров и комплексно отражающая плано-профильную фильтрацию в пределах проницаемых и разделяющих слоев в условиях их осушения и повторного насыщения. По результатам моделирования выполнена оценка показателей гидродинамического режима в естественных условиях на участке расположения объектов горной промышленности в Кривбассе. На основе оценки отклонений компонент баланса доказана способность модели к сохранению адекватности в фактическом диапазоне входных данных при решении прогнозных задач.

Ключевые слова: численное моделирование, фильтрационная неоднородность пород, плано-профильная фильтрация, повторное насыщение, гидродинамический режим

Введение. Для горнопромышленных районов центральной и восточной Украины характерна чрезвычайно высокая техногенная нагрузка. Масштаб изменений геологической среды здесь связан с многообразием природных и техногенных факторов, приводящих к часто необратимым нарушениям гидрогеомеханического и гидрогеохимического режимов. Результатом их действия является развитие суффозионных и карстовых явлений, активизация оползневых процессов, подтопление и оседание дневной поверхности, наиболее выраженные в зоне влияния объектов горной промышленности [1–3].

Достоверная оценка и прогноз этих процессов требует применения современных моделей, описывающих развитие многофакторно обусловленных геологических систем. В некоторых условиях для этого могут использоваться модели установившейся и неустановившейся фильтрации в относительно однородной среде [4], и, вместе с тем, учитывающие одновременное движение воды через поры и гидравлическое течение в расширяющихся со временем трещинах [5]. Однако, в сложных гидрогеологических условиях с множеством переменных параметров, характеризующих фильтрацию в неоднородной среде, чрезмерное упрощение природной обстановки может приводить к недостоверности гидрогеологических прогнозов. В таком случае адекватное описание геофильтрации возможно лишь с помощью численных моделей [6]. Распространенным подходом при численном моделировании подземных вод является переход к плановым или профильным моделям, в которых отражается неоднородность фильтрационных свойств пород с возможностью последующего

решения двух- и одномерных гидродинамических и миграционных задач [2].

Для математического моделирования геофильтрации разработано большое количество программных продуктов, использующих конечно-разностный метод решения систем уравнений, описывающих движение подземных вод. В настоящее время одним из признанных программных продуктов, позволяющих решать задачи фильтрации и миграции подземных вод, является вычислительный комплекс Visual ModFlow [7]. В основу его расчетного алгоритма положены предпосылки Дюпюи о постоянстве напора по вертикали в проницаемых слоях и Мятлева-Гиринского о вертикальном характере фильтрации в разделяющих слоях. Преимуществом вычислительного алгоритма, реализованного в программе Visual ModFlow, является возможность включения в расчет плано-профильной фильтрации во всех слоях, в том числе и водоупорных, которые рассматриваются как гидродинамически активные.

В условиях Криворожского железорудного бассейна, для которого характерны сильно нарушенный режим подземных вод и высокая неоднородность гидрогеологических параметров, необходима достоверная оценка степени развития негативных процессов и адекватный прогноз изменения гидродинамического и гидрогеохимического режимов подземных вод. Это позволит определить причины и механизмы развития опасных геодинамических и инженерно-геологических процессов в техногенно нарушенных условиях.

Цель исследований состоит в разработке и идентификации трехмерной геофильтрационной модели территории центральной части Криворожского бассейна, подверженной влиянию объектов горной промышленности.

Объектом исследования являются процессы геофильтрации в верхней части породного массива в пределах территории, прилегающей к селу Новоселовка и расположенной на южной окраине г. Кривой Рог, в непосредственной близости от хвостохранилищ ЮГОКа и пруда-накопителя шахтных вод в балке Свистуново (рис. 1).



Рис. 1. Границы моделируемой области (М 1:100000): 1, 2 – хвостохранилища ЮГОКа „Войково“ и „Объединенное“, 3 – отвалы „Левобережные“, 4 – пруд-накопитель шахтных вод в балке Свистуново

В пределах исследуемой территории распространен четвертичный водоносный горизонт, представленный, в основном, лессовидными суглинками, иногда песчанистыми. Ниже повсеместно развит водоносный горизонт неогеновых отложений, приуроченный к пескам и известнякам. В фильтрационном отношении водоносные горизонты разделены тяжелыми суглинками и красно-бурыми глинами (рис. 2).

Фильтрационные потери из хвостохранилищ и пруда-накопителя в существующих инженерно-геологических условиях района привели к повышению минерализации подземных вод, развитию суффозии, карстованию водовмещающих пород, оползнеобразованию. Так, за период с 1977 по 2005 гг. минерализация ранее пресных подземных вод неогенового водоносного горизонта увеличилась на порядок и в пределах с. Новоселовка достигла 7 г/л. О проявлениях фильтрационных деформаций на территории населенного пункта свидетельствуют суффозионно-карстовые воронки и проседания, а также многочисленные оползневые подвижки.

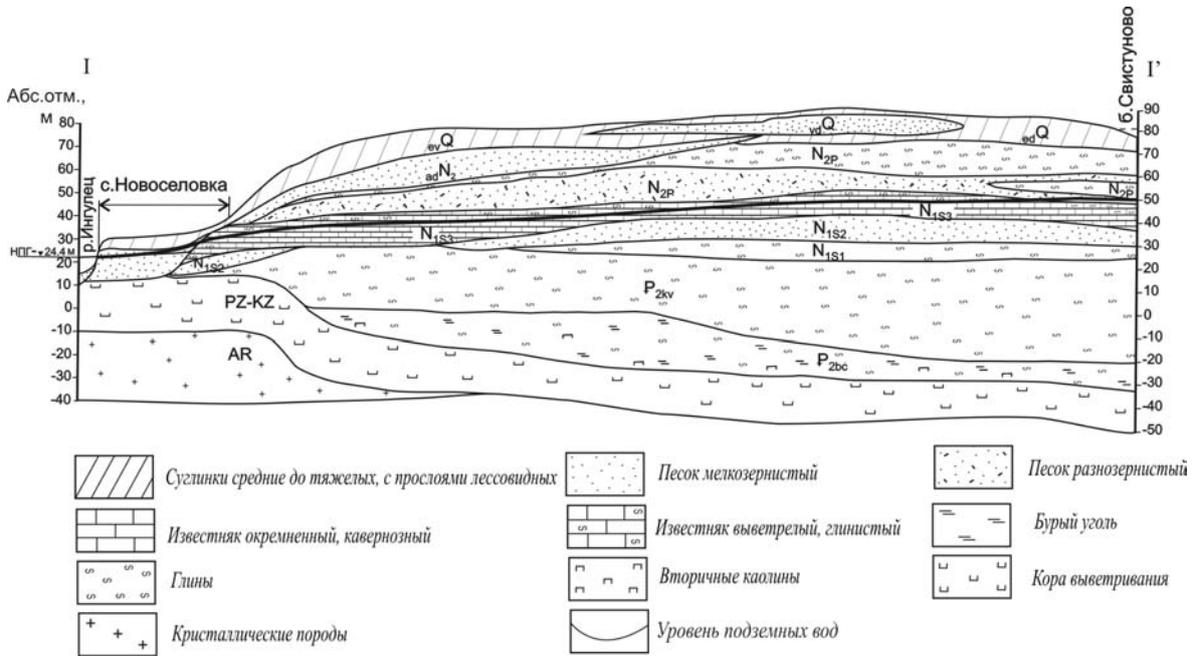


Рис. 2. Схематический геолого-гидрогеологический разрез территории по линии I – I' Горизонтальный масштаб 1:20000

Разработка модели. Модель фильтрации в слоистой толще пород основывается на уравнении движения подземных вод в пористой среде

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(K_{xs} m_s \frac{\partial H_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{ys} m_s \frac{\partial H_s}{\partial y} \right) + \frac{K'_{sl}}{m'_{sl}} (H_s - H_l) + Q = n_0 \frac{\partial H_s}{\partial t}, \quad (1)$$

где s и l – индексы слоев; K_{xs} , K_{ys} – коэффициенты фильтрации пород вдоль осей Ox , Oy в слое s ; m_s – мощность слоя s ; H_s , H_l – гидравлический напор в слоях s и l ; K'_{sl} – усредненный коэффициент фильтрации между слоями s и l ; m'_{sl} – их средняя мощ-

ность, отвечающая длине пути вертикальной фильтрации; Q – дополнительное питание за счет инфильтрации или площадного перетекания; n_0 – активная пористость пород; t – время.

Моделирование выполнено с помощью программного комплекса Visual Modflow 2009.1, в котором уравнение (1) решается конечно-разностным методом. К особенностям программного комплекса следует отнести возможность одновременного расчета фильтрационных и миграционных характеристик в условиях неполного насыщения как в проницаемых, так и в слабопроницаемых слоях, а также циклов

„осушение–насыщение“ массива горных пород, что особенно важно в условиях колебаний уровня подземных вод, вызванных как техногенными, так и естественными факторами.

Расчет фильтрации выполнен для территории от балки Гордоватая до устья балки Свистуново и от р. Ингулец до верховья балки Широкая, охватывающей область питания, транзита и разгрузки подземных вод (рис. 1).

Площадь моделируемой области составляет 37,4 км², шаг сетки в плане – 200×200 м. Ввиду значительной изменчивости фильтрационных и емкостных свойств пород, слагающих геологический разрез, моделируемая область аппроксимирована пятью расчетными слоями: 1 – лессовые породы, 2 – глины, 3 – пески разнотернистые, 4 – известняки окремненные, кавернозные, 5 – пески мелкозернистые. В природном залегании слои 3, 4 и 5 образуют единый комплекс пород в составе неогенового водоносного горизонта. В результате схематизации общая мощность четвертичных отложений принята равной 2–32 м, коэффициент фильтрации – от 0,3 до 0,5 м/сут. Слабопроницаемая толща, мощностью от 2 до 18 м, развита повсеместно, коэффициент фильтрации пород в ней – 0,01 м/сут. Общая мощность водовмещающих пород неогенового возраста колеблется от 5 до 80 м, коэффициент фильтрации в целом составляет 2,5–40 м/сут, причем отдельной зоной аппроксимирован участок, приуроченный к балке Свистуново, с коэффициентом фильтрации до 300 м/сут. Общее количество зон различной проницаемости превышает 30, что позволяет с необходимой детальностью отразить фильтрационную неоднородность породного массива.

Гидрогеологическими границами территории являются р. Ингулец и балка Широкая, где задан среднесуточный уровень воды (условие первого рода). Ввиду значительной расчлененности рельефа изучаемой территории, величина инфильтрации задавалась по 5 зонам, в зависимости от величины поверхностного стока, в диапазоне от 20 до 80 мм/год.

В разработанной модели обеспечивались комплексный учет вертикальной и горизонтальной составляющих фильтрационного потока подземных вод в пределах проницаемой и слабопроницаемой толщ, а также реализация процесса осушения и повторного насыщения моделируемых слоев.

Результаты моделирования. Адекватность модели исследуемому объекту была подтверждена путем решения серии обратных задач в стационарной постановке. Критерием достоверности моделирования являлась сходимость результатов расчетов в ненарушенных условиях с данными наблюдений за гидродинамическим режимом подземных вод, полученными на период до начала строительства и эксплуатации объектов горной промышленности.

Установлено, что в естественных условиях слои 1–4 представляют собой ненасыщенную толщу, за исключением восточной части моделируемой территории, в пределах которой сарматские известняки расчетного слоя 4 незначительно обводнены.

Формирование водного баланса слоев 3 и 4 происходит аналогично верхним толщам и осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и водообмена между смежными слоями (рис. 3, а). Отличительной особенностью слоя 5 является то, что существенное влияние на соотношения между компонентами баланса оказывает разгрузка в р. Ингулец, а также взаимосвязь подземных вод с временными водотоками балок (рис. 3, б).

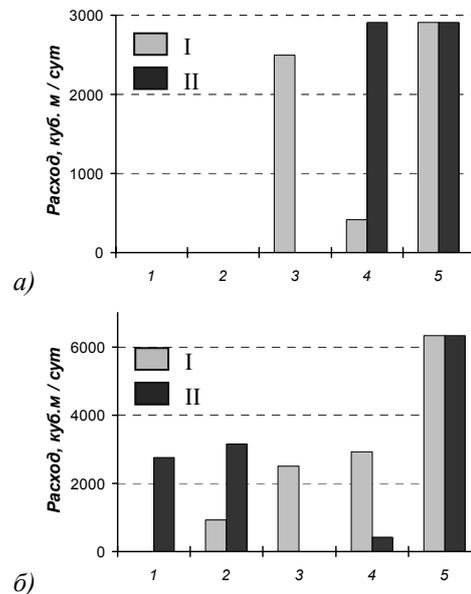


Рис. 3. Составляющие приходных (I) и расходных (II) статей баланса подземных вод слоев 4 (а) и 5 (б): 1 – река; 2 – приток (разгрузка) подземных вод; 3 – инфильтрационное питание; 4 – водообмен со смежным слоем; 5 – суммарный баланс

Вследствие фильтрационной неоднородности пород, слагающих геологический разрез изучаемой территории, и геоморфологического строения района, поток подземных вод неогеновой толщи характеризуется значительной изменчивостью с общим направлением к юго-западу (рис. 4). Рассчитанные уровни и направления течения согласуются с данными режимных наблюдений.

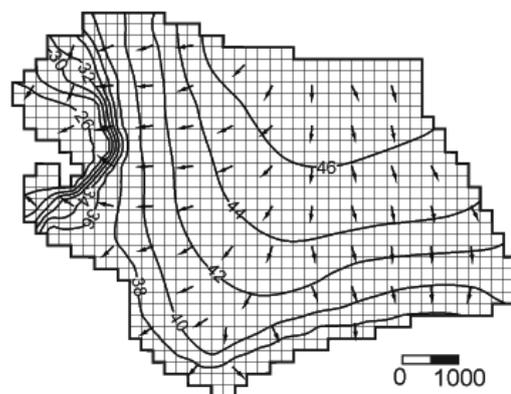


Рис. 4. Карта уровня подземных вод неогеновых отложений в естественных условиях (по данным моделирования)

Проверка устойчивости модели выполнена путем оценки отклонений составляющих баланса 5 слоя при изменении входных данных. При этом рассматривались диапазоны величин инфильтрационного питания W , соответствующие засушливым и многоводным годам, и коэффициенты фильтрации K вследствие деформации пород в условиях суффозии и кольматации. Параметры K и W являются наиболее важными при оценке устойчивости модели в условиях отсутствия техногенного влияния (рис. 5).

Установлено, что увеличению и уменьшению инфильтрационного питания моделируемой области W на 30% соответствуют малые отклонения балансовых составляющих, которые не превышают 7%. При этом наиболее чувствительным к изменению является водообмен между слоями 4 и 5. Вследствие изменения коэффициента фильтрации пород K на $\pm 30\%$, отклонение компонентов баланса составило 1–6% (рис. 5). Полученные результаты подтверждают устойчивость численного решения и достоверность инверсного моделирования.

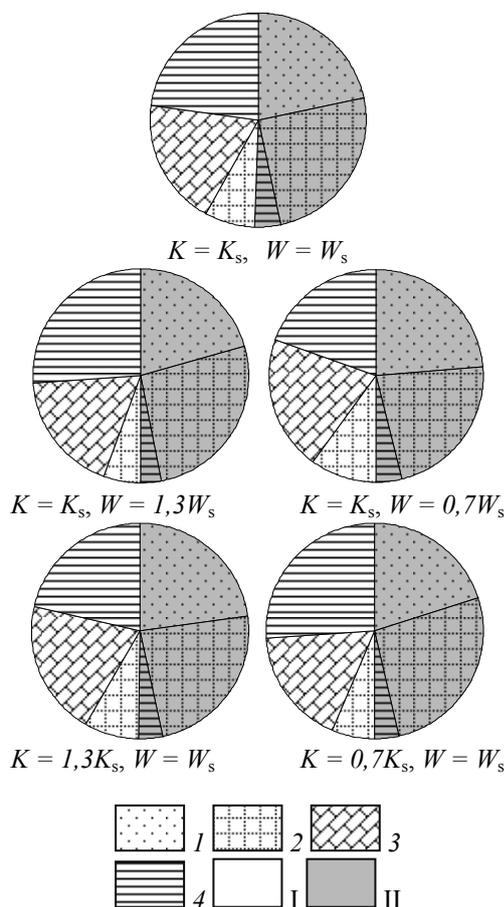


Рис. 5. Оценка изменений водного баланса при изменении параметров K (коэффициента фильтрации) и W (инфильтрационного питания): I, II – статьи баланса приходные и расходные, соответственно; 1, 2, 3, 4 – см. рис. 3; K_s, W_s – средние значения параметров K и W , распределенные по зонам в слое 5

Выводы. Разработанная численная модель учитывает неоднородность гидрогеологических параметров исследуемой области и комплексно отражает планово-профильную фильтрацию в пределах проницаемых и разделяющих слоев в условиях их осушения и повторного насыщения. По результатам моделирования оценены показатели гидродинамического режима подземных вод пяти расчетных слоев исследуемой области в естественных условиях. Выполнена оценка отклонений компонент баланса и доказана способность модели к сохранению адекватности в фактическом диапазоне входных данных.

Численная модель составляет основу для исследования техногенного режима подземных вод, формирующегося под влиянием объектов горной промышленности, с последующей оценкой гидрогеодинамического и гидрогеохимического состояний исследуемой территории в нарушенных условиях.

Список литературы / References

1. *Інженерно-геологічна обстановка в районі Криворізького залізничного басейну України* / [Лушчик А.В., Давиденко І.П., Швирло М.І., Яковлев Є.О.] // Інформаційний бюлетень про стан геологічного середовища України за 1994 – 1995 роки. – 1997. – Вип. 14. – С. 36–41.
Engineering-geological state near Kryvyi Rih iron ore basin in Ukraine / [Lushchik A.V., Davydenko I.P., Shvyrllo M.I., Yakovliev Ye.O.] // Informatsiyniy biuletten pro stan heolohichnoho seredovyshcha Ukrainy za 1994 – 1995 roky. – 1997. – Issue 14. – P. 36–41.
2. *Евграшкина Г.П.* Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий / Евграшкина Г.П. – Д.: Монолит, 2003. – 200 с.
Yevgrashkina G.P. Influence of mining industry on groundwater and soil development conditions of a territory / Yevgrashkina G.P. – D.: Monolit, 2003. – 708 p.
3. *Вплив об'єктів гірничого виробництва на гідрогеомеханічний стан прилеглих територій в умовах Криворізького басейну* / [Тимошук В.І., Демченко Ю.І., Загриценко А.М., Шерстюк Є.А.] // Сб. научн. тр. II Международной научно-практической конференции „Школа подземной разработки“. – Днепропетровск, 2008. – С. 234–237
Influence of mining enterprises on hydrogeomechanical state of adjacent territories at Kryvyi Rih Basin / [Tymoshchuk V.I., Demchenko Yu.I., Zahrytsenko A.M., Sherstiuk Ye.A.] // Collected articles of II International Theoretical and Practical Conference “School of Underground Mining”. – Dnepropetrovsk, 2008. – P. 234–237.
4. *Мироненко В.А.* Проблемы гидрогеоэкологии в 3-х т. / Мироненко В.А., Румынин В.Г. // Т. 2: Опытномиграционные исследования. – [2-е изд., стер.]. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. – 394 с.
Mironenko V.A. Problems of hydroheoecology in 3 volumes. / Mironenko V.A., Rumynin V.G. // Vol. 2: Experimental and migration research. – [2 edition.,

ster.]. – M.: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2002. – 394 p.

5. Рудаков Д.В. Прогнозування фізико-хімічних змін водотривких порід під впливом накопичувачів рудничних вод (на прикладі Кривбасу) / Рудаков Д.В., Воробйова Т.І. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2008. – №5. – С. 63–66.

Rudakov D.V. Prediction of physical and chemical changes of waterproof rocks under the influence of mine water storage ponds / Rudakov D.V., Vorobyova T.I. // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnichoho universytetu. – 2008. – No.5. – P. 63–66.

6. Spizzichino K. Numerical Groundwater Modeling / Spizzichino K., Walton W. C. – CRC Press, 1989. – 272 p.

7. McDonald. ModFlow. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. Open-file report / McDonald, Harbaugh M.C., Harbaugh A.W. // U.S. Geological Survey – 1988. – P. 83–875.

Розроблено чисельну модель, яка враховує неоднорідність гідрогеологічних параметрів та комплексно відтворює планово-профільну фільтрацію в межах проникних та роздільних шарів в умовах їх осушення і повторного насичення. Згідно з результатами моделювання виконано оцінку показників гідродинамічного режи-

му в природних умовах на ділянці розташування об'єктів гірничої промисловості у Кривбасі. На основі оцінки відхилень компонент балансу доведено здатність моделі до збереження адекватності у фактичному діапазоні вхідних даних при рішенні прогнозних задач.

Ключові слова: чисельне моделювання, фільтраційна неоднорідність порід, планово-профільна фільтрація, повторне насичення, гідродинамічний режим

The numerical model that takes into proper account the heterogeneity of hydrogeological parameters and describes 3D ground water flow in aquifers and confining layers after their dewatering and rewetting was developed. The factors influencing the natural hydrodynamic behavior at a site affected by mining enterprises of Kryvbass were estimated by the results of modeling. The ability of the model to maintain adequacy within the actual range of input data was proved by the assessment of budget component deviations while solving predictive problems.

Keywords: numerical modeling, rock heterogeneity, 3D ground water flow, rewetting, hydrodynamic behavior

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.А. Ковалевської. Дата надходження рукопису 23.03.11

УДК 622.272:622.257.1

М.І. Ступнік, канд. техн. наук, доц.

Криворізький технічний університет, м. Кривий Ріг, Україна,
e-mail: kpv_p@hotmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЛИНОВМІСНИХ ВМІЩУЮЧИХ ПОРІД

М.І. Stupnik, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

Kryvyi Rih Technical University, Kryvyi Rih, Ukraine,
e-mail: kpv_p@hotmail.com

RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ARGILLIFEROUS BEARING STRATA

Виконаними дослідженнями встановлено, що збільшення вологості глинистих порід провокує набухання і максимізацію пластичності порід, а зменшення вологості призводить до виникнення явища їх усадження, що негативно впливає на технологію підземного видобутку корисних копалин.

Ключові слова: глинисті породи, набухання, підземний видобуток, вміст води, зсув, моделювання, випуск руди

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Глини є широко розповсюдженими в геологічному доквіллі і покривають загально біля 42% поверхні земної кори. У мікроскопічному вимірі глини представлені об'єднанням часток розміром менше за 2 μm, заряджених негативно, таких як смектит, іллїт і каолінит. Присутність цих мінералів робить глини дуже чутливими до поляризованих молекул води. Ця чутливість виражається шляхом набухання, різкого підвищення пластичності та змінами інших механічних властивостей.

Вирішальним чинником, який обумовлює варіації об'єму (набухання) та пластичних властивостей, є

вміст води. Збільшення вологості провокує феномен набухання і максимізацію пластичності, її зменшення – явище усадження.

Варіація об'єму глини і їх пластичних властивостей значною мірою відбувається під впливом мікроскопічних і макроскопічних чинників. У мікроскопічному вимірі ці фактори є досить складними і залежать, головним чином, від мінералогічних властивостей глинистого матеріалу і хімічних властивостей гідратуючих рідин.

Дослідження мікроскопічних явищ є необхідними для глибокого розуміння та інтерпретації явищ, що спостерігаються.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел дозволив визначити чотири головні фактори, які пояснюють причини набухання: гідра-