

ОСЕДАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ, ВЫЗВАННОЕ ПОНИЖЕНИЕМ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД¹

Проф., докт. техн. наук ЗИГУМУТ ГЛАЗЕР²,
докт. техн. наук РЫШАРД КАЧЫНСКИ² и д-р ВУ ЦАО МИН³

Реферат. В статье приводятся результаты расчета полной и зависящей от времени частной осадки поверхности грунта, вызванной понижением уровня грунтовых вод до глубины примерно на 100 м. Описывается геологическая структура района и даются детальные инженерно-геологические характеристики.

Оседание земной поверхности может происходить под действием нескольких факторов, включая глубокий дренаж, связанный с открытыми разработками минерального сырья. Открытие богатого месторождения бурого угля в районе Белхатов (центральная Польша) и решение о его эксплуатации вызвало необходимость предпринять подобные крупномасштабные работы по глубокому дренированию. Белхатовское месторождение бурого угля расположено в глубокой широтной сбросовой мульде, проходящей через сильно нарушенную часть Щецин-Полдзь-Мехувского синклинорума. Более древние породы сложены мезозойскими (триассовыми, юрскими и меловыми) отложениями, тогда как палеозой представлен цехштейновыми отложениями соляного купола.

Мезозойские породы перекрыты третичными и четвертичными отложениями, изменяющимися по мощности и горизонтальному распределению. Третичная и в особенности миоценовая свита глинисто-пылевато-песчаных отложений с пластами бурого угля являются наиболее мощными в области мульды. Отложения бурого угля относятся к типу тектонических депрессий, образованных в сбросовой мульде (рис. 1). В соответствии с их генезисом отложения в плане узкие и удлиненные, их ширина составляет от 1,5 до 2 км, а длина около 40 км. Мощность пластов угля в среднем около 60 м, увеличиваясь местами до 250 м. Наряду с мощностью покровной толщи, приближающейся и даже превышающей местами 150 м, это приводит к тому, что открытые разработки угля должны иметь глубину свыше 200 м, а на некоторых участках — более 300 м.

В Белхатовском месторождении различаются три водоносных горизонта: четвертичный, третичный и мезозойский. Водоносные горизонты в вертикальном направлении хорошо связаны, между ними имеется также горизонтальный контакт.

На основании изучения и анализа обстановки была установлена система дренирования. Для того чтобы дренировать покровную толщу и уменьшить давление на подошву пласта угля, необходимо было дре-

¹ Перевод с английского проф. Г. И. Тер-Степаняна.

² Геологический факультет Варшавского университета.

³ Старший науч. сотр. Национального центра научных исследований, Ханой.

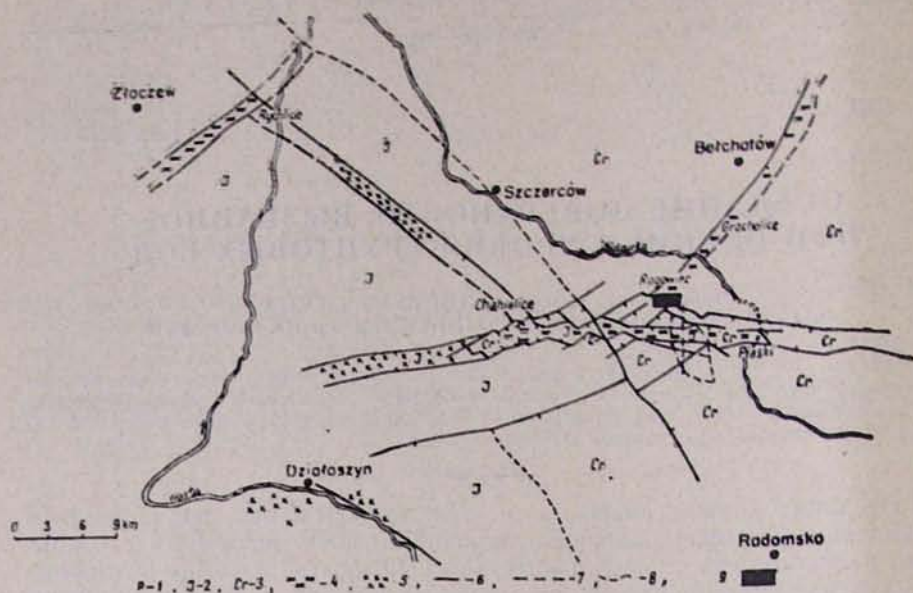


Рис. 1. Геологическая схема района Белхатова (по S. Biernat, 1975). 1—цехштейн; 2—средняя и верхняя юра; 3—средний и верхний мел; 4—бурый уголь; 5—карстовые явления; 6—тектонические линейменты (установленные); 7—тектонические линейменты (предполагаемые); 8—геологические границы; 9—местоположения сооружений силовой станции.

նկ. 1. Բիլխատով շրջանի երկրաբանական քարտեզ (բնու. S. Biernat, 1975): 1 — Ցեխշտեյն, 2 — միջին և վերին յուրա, 3 — միջին և վերին կավիճ, 4 — գորշ ածուխ, 5 — կորստային երևույթներ, 6 — տեկտոնիկ լինեամենտներ (հաստատված), 7 — լինեամենտներ (ենթադրվող), 8 — երկրաբանական սահմաններ, 9 — ուժակայանի կառուցվածքների տեղադրությունը:

Fig. 1. Geological sketch of the Belchatów area (after S. Biernat, 1975). 1—Zechstein, 2—Middle and Upper Jurassic, 3—Middle and Upper Cretaceous; 4—brown coal; 5—karst phenomena; 6—tectonic lineaments (stated); 7—tectonic lineaments (inferred); 8—geological boundaries; 9—area of power plant objects.

нирывать отложения на глубину около 300 м ниже земной поверхности. Выбранная схема дренирования состояла из барьера глубоких колодцев, расположенных вне открытых разработок и на их бермах.

Согласно гидрогеологическим прогнозам количество откачиваемой воды будет вначале увеличиваться и стабилизируется на уровне около 250 млн. м³ в год примерно через 10 лет. Радиус депрессионной воронки, который будет увеличиваться вместе с расходом воды, согласно гидрогеологическим прогнозам будет несколько превышать 40 км. Это заметно увеличивает значение прогноза влияния понижения уровня грунтовых вод на окружающую среду, включая сюда и оседание поверхности.

Оседание земной поверхности будет заметным на обширной площади. Если в одних районах оно практически не будет иметь никаких последствий, то в других может оказать влияние на условия эксплуатации и угрожать безопасности инженерных сооружений. Поэтому прогноз оседания должен быть сделан с большой точностью. Прогноз величины и времени осадки особенно важен для сооружений электростанции, возводимой вблизи от открытых разработок. Электростанция будет сооружена примерно в 2 км к северу от месторождения. Депрес-

депрессионная кривая изменит свою форму, и уровень грунтовых вод сработает уже к концу строительства электростанции и началу ее эксплуатации. Площадь, занимаемая проектируемыми сооружениями электростанции, составляет около 1,8 км².

Более древние пласты представлены карбонатно-силикатно-мергельными породами мелового возраста. Поверхность меловых пород очень расчленена в результате ларамийских и тортонских тектонических движений, карстовых явлений и интенсивной эрозии и выветривания меловых пород в течение палеогена. Более того, в меловых породах под сооружениями, чувствительными к неравномерной осадке, был прослежен сброс СЗ—ЮВ направления. Разность высот поверхности меловых пород достигает 25 м. Меловые породы покрыты кайнозойскими отложениями, представленными третичными породами различной мощности и ограниченными в фундаменте депрессиями, и толщей четвертичных отложений, залегающей повсеместно.

Образование депрессионной кривой приведет к дренированию кайнозойских и верхней части меловых отложений; величины и разности осадок земной поверхности будут прямо зависеть от механических свойств грунтов фундамента. Поэтому необходимо сделать предварительный анализ, позволяющий провести отбор, изучение и регистрацию элементов, непосредственно влияющих на работу проектируемых объектов. Падение уровня грунтовых вод на 90 м вызовет устранение взвешивания и таким образом повышение эффективных напряжений в грунтах основания от 0 до 18 кг/см². Оседание меловых пород будет небольшим и практически незначительным по сравнению с оседанием вышележащих грунтов и поэтому они могут рассматриваться как практически несжимаемые. Это делает необходимым определение глубины расположения несжимаемых коренных пород с соответствующей точностью.

Другими важными задачами являются реконструкция хода снижения уровня и анализ изменений траектории напряжений в грунтовом массиве, требующие изучения геологических и гидрогеологических условий. Имеются по крайней мере три слоя связанных грунтов в основании объектов электростанции, требующие критического анализа результатов гидрогеологического прогноза, принимая упрощенную модель расчета среды с однородными фильтрационными свойствами. До окончания строительства электростанции величина сработки была оценена в 30 м. Однако эта величина не может быть использована при определении оседания, если принять во внимание существующие гидрогеологические условия. Слои слабопроницаемых связанных грунтов будут уменьшать скорость вытекания воды из песчаных отложений по сравнению с той, которая была принята в гидрогеологическом прогнозе. Анализ, учитывающий инфильтрацию атмосферных осадков, показывает, что до окончания строительства электростанции произойдет менее двух третей предсказанной сработки. Таким образом, оседание в результате дренирования основания будет в основном происходить после окончания строительства объекта.

Отсюда следует, что анализ траектории напряжений в грунтах основания должен учитывать увеличение как эффективных напряжений, происходящее в результате снятия взвешивания и веса инфильтрующихся вод, так и сил, возникающих вследствие просачивания подвешенной воды в подстилающие, предварительно осушенные слои грунта.

Нами определены характеристики 8 инженерно-геологических серий, различающихся по грунтам основания электростанции.

Значения физико-механических параметров были определены в ходе полевых и лабораторных исследований. Лабораторные исследования, в особенности те, которые были проведены в Институте гидрогеологии и инженерной геологии Варшавского университета, относятся главным образом к характеристикам зависимости между напряжениями, деформациями и временем. Эти зависимости были получены на одометрах при нагружении до 16 кг/см^2 , а также на специальном консолидаторе с измерением порового давления, спроектированном Ву Цао Минном (Vu Cao Minh, 1976).

До последнего времени анализ консолидации грунта производился на основании теории одноосной консолидации Терцаги. Основное уравнение Терцаги

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

где u — поровое давление, z — расстояние от границы консолидирующегося слоя, t — время и c_v — коэффициент консолидации

$$c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v}, \quad (2)$$

где k — коэффициент фильтрации, e — коэффициент пористости, γ_w — объемный вес воды, a_v — коэффициент сжимаемости.

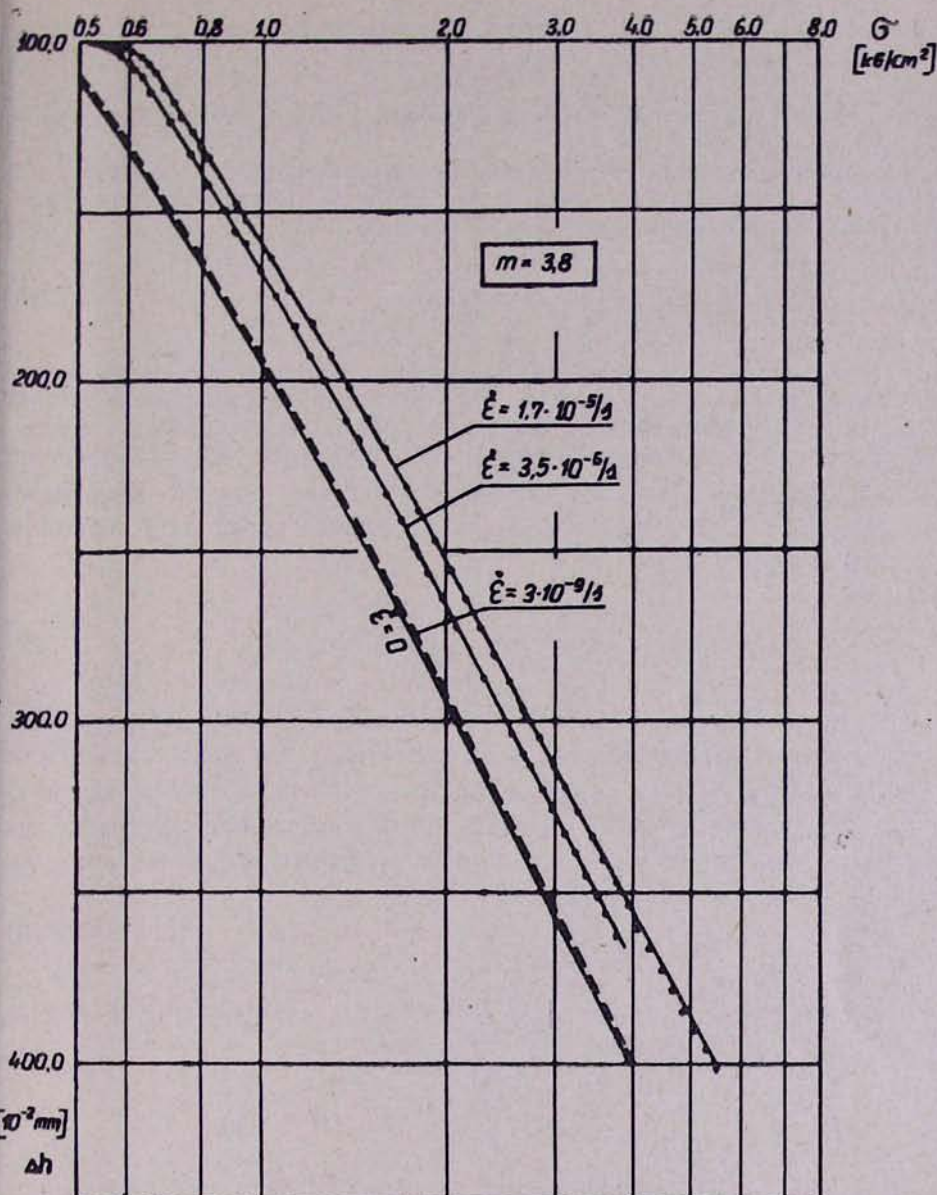
Как и другие теории, теория Терцаги основана на ряде упрощающих допущений. Исследования показали, что теоретическая кривая, полученная в соответствии с уравнением Терцаги, обычно не совпадает с экспериментальной кривой и что степень консолидации и степень рассеяния порового давления в данный момент времени различны. Лабораторные исследования показали, что ход консолидации зависит от нескольких факторов, включая высоту образца, нагрузку, продолжительность предшествующей фазы нагружения и т. д. Вследствие этих расхождений часто различают первичную и вторичную консолидацию. Различие между теоретической и экспериментальной кривыми объясняется в основном ползучестью скелета во времени, которая не учитывается в уравнении Терцаги. Ползучесть начинается одновременно с приложением нагрузки и продолжается до окончания консолидации. Для того чтобы лучше привести в соответствие теорию с результатами эксперимента, предлагается следующим образом видоизменить уравнение (Vu Cao Minh, 1976)

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{\beta} (e_\infty - e)^m, \quad (4)$$

где ε — вертикальная деформация к данному моменту времени, e_∞ — конечная деформация, m и β — постоянные коэффициенты.

Изучение консолидации показало, что поровое давление увеличивается при нагружении до некоторой величины и в последующем стабилизируется несмотря на дальнейшее увеличение нагрузки. Скорость деформирования вначале увеличивается и стабилизируется, когда поровое давление становится постоянным. Отсюда следует, что можно

Рис. 2. Зависимость Δh от σ' .Նկ. 2. Δh -ի կախումը σ' -ից:Fig. 2. Dependence of Δh on σ' .

различать нестабилизированную и стабилизированную фазы консолидации.

В нестабилизированной фазе поровое давление и скорость деформации увеличиваются до некоторой величины. В стабилизированной фазе поровое давление и скорость деформации становятся постоянными, а эффективные напряжения возрастают с постоянной скоростью. Это позволяет записать следующее уравнение скорости деформации:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \left(\frac{\sigma'}{E_{\text{оed}}} - \varepsilon \right)^m, \quad (5)$$

где σ' — эффективные напряжения в образце, подвергнутом нагрузке p , $E_{\text{оed}}$ — одометрический модуль.

Соотношения между эффективными напряжениями, величиной нагрузки и максимальным значением порового давления в фазе стабилизированной консолидации могут быть записаны так:

$$\sigma' = p - \frac{2}{3} u. \quad (6)$$

Проведенные исследования позволили разработать новый метод испытания сжимаемости грунта. Этот метод предусматривает приложение к грунту вертикальной нагрузки с постоянной скоростью и в последующем поддержание постоянной скорости деформирования, $\dot{\varepsilon} = \text{const}$. Опыты при $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ позволяют получить график зависимости между σ' и ε , откуда, пользуясь следующим уравнением, находим параметры m и β :

$$\lg(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) = \frac{1}{m} \lg \varepsilon_i + \lg \beta^{\frac{1}{m}} (1 - N^{\frac{1}{m}}), \quad (7)$$

где N — произвольное действительное число $N > 0$, а ε_i и ε_{i+1} — величины деформации, полученные при постоянном значении σ' ; скорости $\dot{\varepsilon}_i$ и $\dot{\varepsilon}_{i+1}$ выбраны таким образом, чтобы $\dot{\varepsilon}_{i+1} = N \dot{\varepsilon}_i$. Затем вычисляется зависимость между σ' и ε_{∞} для случая постоянной скорости деформирования. Величина ε_{∞} для этой цели определяется по формуле

$$\varepsilon_{\infty} = \varepsilon + \beta^{\frac{1}{m}} \frac{1}{\dot{\varepsilon}^{\frac{1}{m}}}. \quad (8)$$

Одометрический модуль для выбранного интервала напряжений считается с графика зависимости между σ' и ε_{∞} .

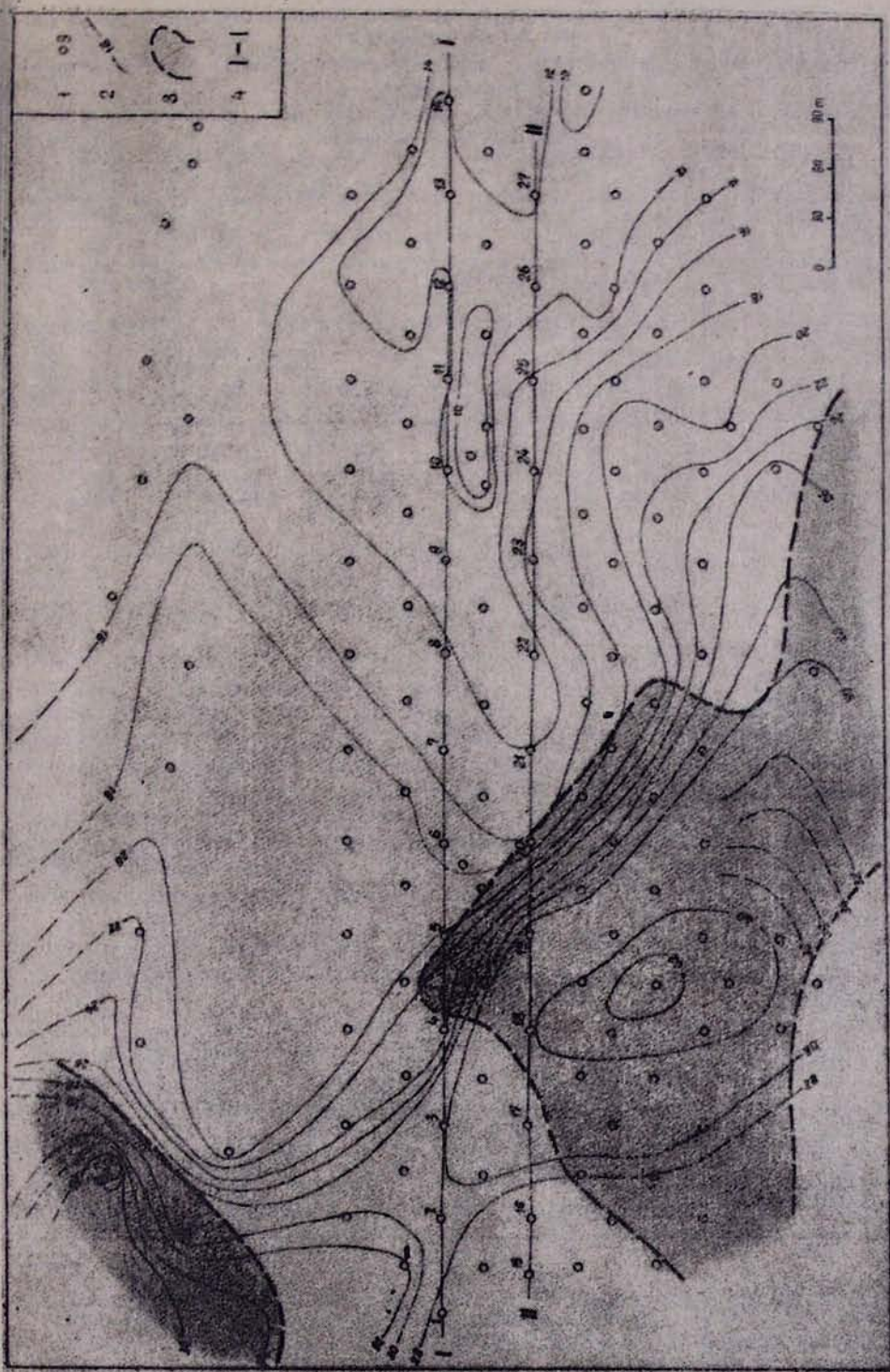
$$E_{\text{оed}} = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \varepsilon_{\infty}}. \quad (9)$$

Для определения значений $E_{\text{оed}}$, c_v , β и m необходимо провести 3 опыта при различных скоростях деформирования, тогда как для определения M_0 — только один опыт при малой постоянной скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = \text{const}$, порядка 10^{-6} 1/с. Во время опыта регистрируется зависимость между значениями эффективных напряжений σ' по

Рис. 3. Изолинии наибольшего оседания. 1 — наблюдательная точка и ее номер; 2 — изолиния оседания 16 см; 3 — месторождение бурого угля; 4 — линия разреза.

Բն. 3. Առավելագույն համահստման հավասարագծեր: 1 — դիտման կետ և նրա համարը, 2 — համահստման հավասարագիծ՝ 16 սմ, 3 — դրոշ անխի հանքավայր, 4 — կտրվածքի դիմ.

Fig. 3. Maximum subsidence isolines. 1 — observation point and its number; 2 — subsidence isoline 16 cm; 3 — area of occurrence of brown coal; 4 — line of cross-section.



Одометрический модуль сжимаемости M_0 пасты пылеватой глины, измеренной различными методами, кг/см²

Փարբեր եղանակներով չափած փոշային կավի պաստայի օդոմետրիկ սեղմելիականության M_0 մոդուլը, կգ/սմ²-ով

Oedometric compressibility modulus M_0 of silty clay paste measured by various technique, in kg/cm²

Интервал напряжений, кг/см ²	Изучено методом постоянной скорости деформации				По одометрическим опытам
Լարումների ինտերվալը, կգ/սմ ²	Ուսումնասիրված է զեֆորմացիայի հաստատուն արագության եղանակով				Օդոմետրային փորձերից
Stress interval, kg/cm ²	Studied at constant strain rate technique				From oedometer test
	$\dot{\epsilon}=1,7 \cdot 10^{-5}$ sec ⁻¹	$\dot{\epsilon}=8,5 \cdot 10^{-6}$ sec ⁻¹	$\dot{\epsilon}=3,5 \cdot 10^{-6}$ sec ⁻¹	$\dot{\epsilon}=0$	
0,5—1,0	12,5	12,1	11,9	11,3	11,3
1,0—2,0	19,6	19,1	19,0	18,2	18,2
2,0—4,0	34,0	33,2	32,8	29,0	29,2

(6) и деформацией ϵ . После того как установлена зависимость между σ' и ϵ при $\dot{\epsilon} = \text{const}$, возможно вычислить с достаточной точностью значение E_{oed} для данной скорости, используя уравнение (9). Зависимость между Δh и σ' показана на рис. 2.

Таблица показывает результаты изучения грунтовых паст, приготовленных из пылеватых глин; значения E_{oed} вычислены из единственных кривых. Полученные значения сравнены со значениями, определенными классическим методом. Разработка нового метода определения сжимаемости позволяет получать параметры сжимаемости грунтов в единичном испытании, длящемся менее нескольких часов.

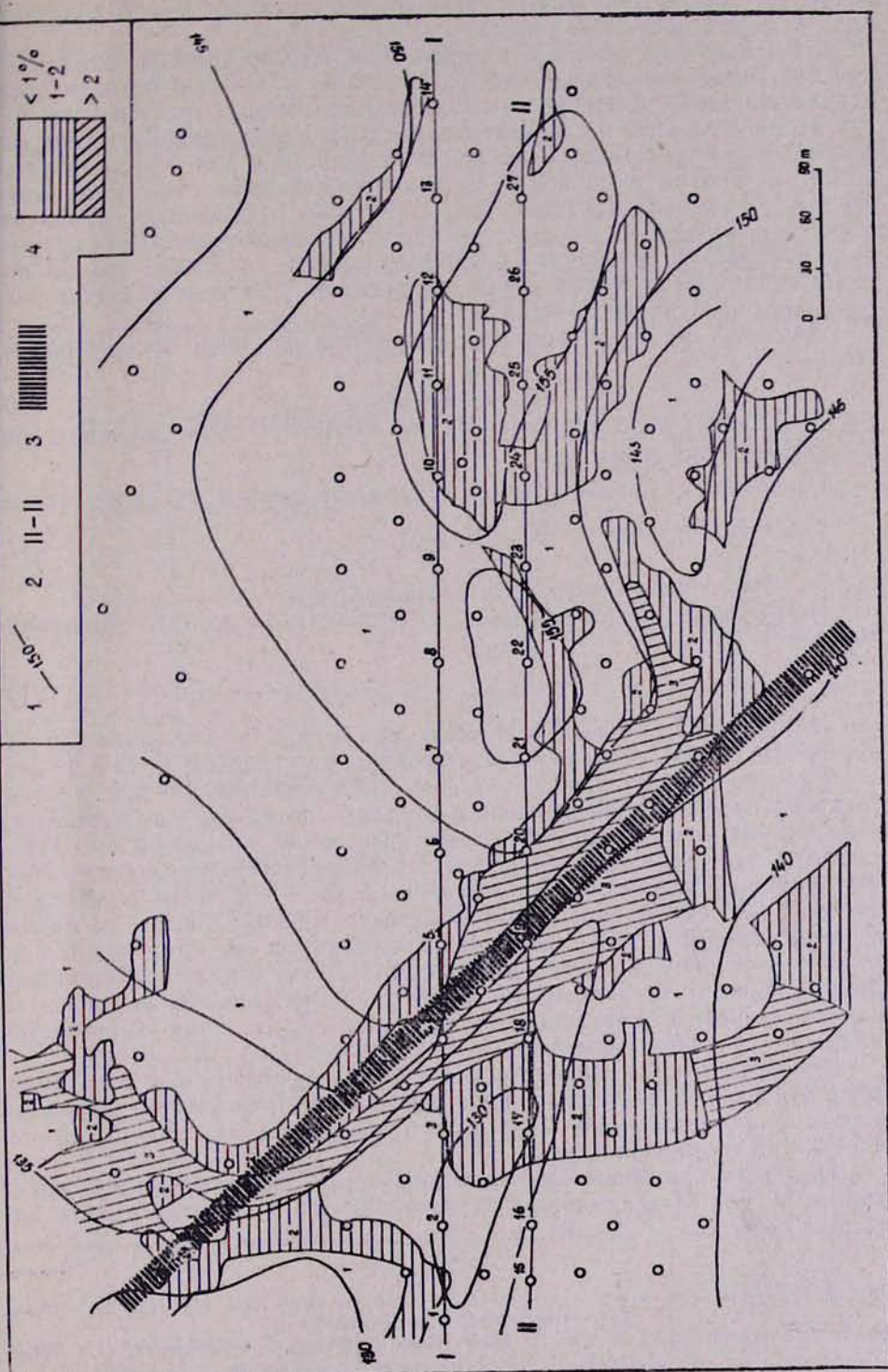
Нами определены параметры, вычисленные по результатам полевых и лабораторных испытаний для отдельных грунтовых серий. Значения оседания поверхности вследствие дренажа были вычислены для всех разбуренных профилей. Вычисления проведены по двум схемам:

1) при полном дренировании покровных грунтов (минимальное значение оседания); вычисления произведены методом траектории нагружения.

2) при дренировании несвязных грунтов, залегающих над меловыми коренными породами, и водонасыщенными слоями грунта, залегающих над подошвой наносов—весьма неблагоприятный случай. Вычисления произведены в терминах эффективных напряжений, учитывая поровое давление (максимальное значение оседания).

Для случая бурых углей вычисления были произведены для двух различных значений одометрического модуля вследствие существенного нарушения структуры образцов и высокой вариабельности

Рис. 4. Схематическая карта наклона поверхности земли. 1—изолинии кровли меловых пород; 2—линия разреза; 3—зона сброса; 4—наклонение в промиях (‰).
Նկ. 4. Գետնի մակերևույթի բեկորային սխեմատիկ քարտեզ: 1—կավճալի եզրերի կտրուկի հանվանադժներ, 2—կտրվածքի գծեր, 3—Նետեղքի գոտի, 5—Թեթևություն պրոմիլներով (‰):
Fig. 4. Sketch map of inclination of terrain surface. 1—isolines of the top of Cretaceous bedrock; 2—line of cross-section; 3—fault zone; 4—inclination in ‰.



вскрытых углей. Полученные значения представляют собой конечные величины оседания слоев грунта.

Учитывая геологические и гидрогеологические условия, была принята наиболее неблагоприятная по величине и времени стабилизации оседания модель. Движение вытекающей из связных грунтов воды будет направлено вниз и таким образом длина фильтрационного пути для серий 2 и 3 будет равна половине их толщины, а для всех остальных серий—их полной толщине. Вычисления произведены для случая мгновенного увеличения нагрузки. Для того чтобы приспособить принятую схему к реальной ситуации, т. е. к постепенному увеличению нагрузки в результате медленного понижения уровня грунтовых вод до поверхности меловых пород в течение времени t_0 , за начало схемы расчета было принято время $0,5 t_0$.

Величина оседания слоя связных грунтов за данное время t равняется

$$S_{it} = U_i S_i, \quad (10)$$

где U_i —степень консолидации, $U = f(T) = f(c, t/H^2)$, H —толщина слоя, S_i —конечное оседание слоя.

Оседание всех слоев связных грунтов за время t является суммой

$$S_t = \sum_{i=1}^{i=n} U_i S_i, \quad (11)$$

где n —число слоев связных грунтов на профиле.

Оседание земной поверхности во времени в результате дренажирования равняется

$$S = S_0 + S_t, \quad (12)$$

где S_0 —оседание несвязных грунтов. В качестве оптимальных для характеристики хода оседания были выбраны интервалы 2, 5, 10 и 20 лет.

Расчеты позволили построить изолинии оседания. На рис. 3 представлены изолинии максимального оседания объектов, чувствительных к неравномерному оседанию, проведенные через каждые 2 см. Замечается общее увеличение величины оседания с востока к западу. Резкая граница области оседания, наблюдаемая в ЮВ части территории, представляет склон удлиненной области максимального оседания, ориентированный с СЗ на ЮВ. Восточный склон области значительно более крутой, чем западный, что свидетельствует о наличии тектоники. Общий характер оседания земной поверхности такой же, как областей максимального и минимального оседания, и различие заключается только в амплитуде оседания.

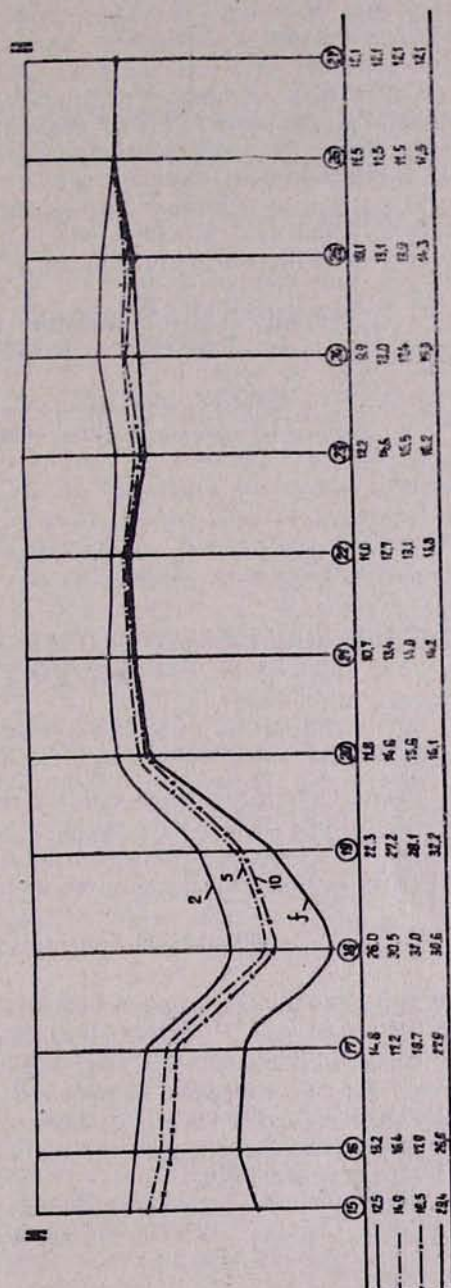
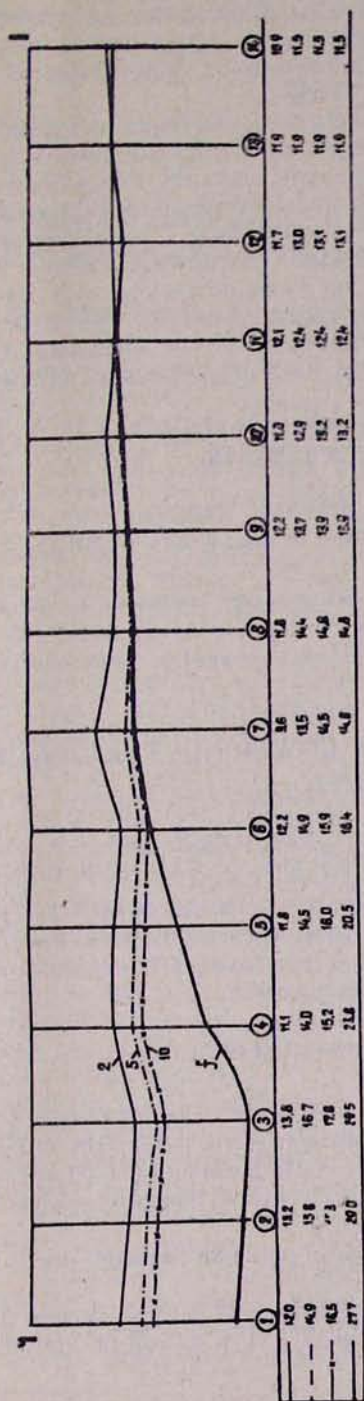
Максимальные величины оседания прежде всего связаны с наличием буроугольных отложений на профиле. Величины, полученные на схемах максимального и минимального оседания, составляют 10—50 и 5—35 см, соответственно.

На рис. 4 приведена карта наклона поверхности территории, определенного для максимальных значений оседания. Максимальные на-

Рис. 5. Оседание в см через 2, 5 и 10 лет и конечное значение (f) . Цифры в кружках—номера наблюдательных точек.

Կգ. 5. Համախառն ամ-ով 2, 5 ու 10 տարի հետո և վերջնական նշանակություն (f) , թվերը շրջաններում — դիտման կետերի համարներն են:

Fig. 5. Subsidence in cm after 2, 5 and 10 years and final value (f) . Figures in circles are numbers of observation points.



клоны, превышающие 2‰, в результате дренирования произойдут в ЮЗ части территории, а оптимальные условия будут иметь место в центральной и восточной частях, где общий наклон будет равен 0—1‰ и только местами будет превышать 1,0—1,5‰.

На рис. 5 даются разрезы, показывающие значения оседания через 2, 5 и 10 лет и конечные значения и иллюстрирующие ход оседания ко времени. Эти данные показывают, что оседание поверхности будет различаться во времени. Максимальное отставание оседания будет иметь место на участках, где оседание наибольшее. Результаты показывают общее уменьшение скорости оседания по направлению к западу. В экстремальных случаях оседание на некоторых участках на востоке через 2 года составит около 90% общей величины, тогда как на некоторых участках западной части территории оно не превысит 50% ее общей величины и приблизится к 70% не ранее чем через 20 лет.

ԳԵՏՆԱԶՐԵՐԻ ՄԱԿԱՐԳԱԿԻ ԻՋԵՑՄԱՆ ՀԵՏԵՎԱՆՔՈՎ ԱՌԱՋԱՑԱՆ ԳԵՏՆԻ ՀԱՄԱՆՍՏՈՒՄ

Պրոֆեսոր, տեխն. գիտ. դոկտոր ԶԻԳՄՈՆՏ ԳԱԶԵՐԻ,
տեխն. գիտ. դոկտոր ՌԻՉԱՐԴ ԿԱԶԻՆՍԿԻ և դոկտոր ՎՈՒ ՑԱՈ-ՄԻՆԶ

Ռեֆերատ—Հոդվածում նկարագրում են գետնի մակերևույթի ընդհանուր և մասնակից կախված մասնավոր նստումը, որն առաջանում է մոտ 100 մ-ով գետնաջրերի մակարդակի իջեցման հետևանքով: Նկարագրվում է շրջանի երկրաբանական կառուցվածքը, արվում են ինժեներական մանրագծերն բնութագրելու:

SURFACE SUBSIDENCE CAUSED BY LOWERING THE GROUND WATER LEVEL

ZYGMUNT GLASZER, Prof., Dr. Hab. (Eng.)³, and
RYSZARD KACZYNSKI, Dr. Hab. (Eng.)³ and VU CAO-MINH, Dr.⁴

Synopsis. The paper deals with the results of calculations of total and partial time-settlement of ground surface caused from about 100 m drawdown of groundwater table. The geological structure of the area is discussed and the detailed engineering-geological characteristics is given on its background.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ—ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

- Biernat S. 1975. The neotectonics of Belchatów area.—Proc. „Recent and neotectonic crustal movements on Poland”, Wyd. Geol. Warszawa, v.1, p. 111—119 (in Polish).
Glazer et al. 1975. The influence of groundwater level lowering for total and difference ground settlement of power station Belchatów—Rogowlec.—Arch. Zakł. Prac Geologicznych U. W. Warszawa.
Vu Cao-Minh. 1976. One-dimensional consolidation of soils with creeping.—Univ. Diss., Warszawa (in Polish).
Vu Cao-Minh. 1977. New method of oedometrical testing of general compressibility modulus.—Inżynieria i Budownictwo, Warszawa, v. 1. p. 25—28 (in Polish).

¹ Վարչական համալսարանի երկրաբանական ֆակուլտետ:

² Գիտական հետազոտությունների ազգային կենտրոն, Հանոյ:

³ Geological faculty, Warsaw University.

⁴ Senior Researcher, Institute of Earth's Sciences, Hanoi.