



ИНДУКТИВНЫЕ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ПРОСАДОЧНОСТИ

SOME POSSIBILITIES OF INDUCTIVE MATHEMATICAL MODELING OF THE DEGRADATION PROCESS OF SUBSIDENCE LOESS SOIL PROPERTIES

МОКРИЦКАЯ Т.П.

Доцент кафедры геологии и гидрогеологии и заместитель декана геолого-географического факультета Днепропетровского национального университета им. Олесь Гончара, к.г.н., г. Днепропетровск, Украина, mokritska@i.ua

MOKRITSKAYA T.P.

Associate professor of the geology and hydrogeology department and deputy dean of the geology and geography faculty of the Oles Gonchar Dnepropetrovsk National University, PhD (candidate of science in Geology), Dnepropetrovsk, Ukraine, mokritska@i.ua

Ключевые слова:

лесс; деградация просадочных свойств; индуктивное математическое моделирование; метод группового учета аргументов (МГУА).

Key words:

loess; subsidence properties degradation; inductive mathematical modeling; group method of data handling (GMDH).

Аннотация

В статье приведены результаты анализа и прогноза деградации просадочности грунта с помощью индуктивного математического моделирования на основе метода группового учета аргументов (МГУА). Рассмотрены различные сценарии развития событий на примерах короткого временного ряда экспериментальных данных и представительной выборки. Анализ факторных переменных в зависимости от вида используемой индуктивной математической модели позволяет упорядочить ряд по важности показателей. Апробация методики решения прогнозных задач по деградации просадочных свойств выполнена на примере нескольких объектов, расположенных в зоне распространения просадочных лессовых грунтов большой мощности (на территории г. Никополя в Украине). Получены статические и динамические модели деградации, которые могут быть применены для решения задач по изменениям просадочных свойств во времени и по нахождению области предельных состояний.

Введение

Изучение региональных особенностей строения перигляциальной (лессовой) формации на территории Украины (В.Ф. Краевым, И.С. Комаровым и др. [4]) показало, что в окрестностях г. Никополя ее мощные толщи характеризуются значительными величинами относительной просадочности в области дополнительных напряжений. Построение математических моделей развития просадок и процесса деградации просадочности, в том числе в области природных напряжений, представляет научный интерес, несмотря на длительность изучения лессовых пород.

Изменения свойств формации связывают с функционированием природно-техногенных систем различного назначения — гидротехнических, строительных, горно-металлургических, связанных с атомной промышленностью, селитебных [1]. В данной работе рассмотрены особенности изменений состояния и свойств лессовой формации на примере десяти участков, изученных в 1957–2006 гг. Материалы исследований были переданы автору для научной обработки. Все изучаемые объекты расположены на территории г. Никополя и характеризуются сходством инженерно-геологических условий. В составе зон влияния зданий и сооружений малой и средней этажности до изученной глубины 44 м присутствуют отложения *причерноморско-дофиновского*, *бугского*, *прилукско-витачевского* нерасчлененного, *днепровского* и *завадовского* горизонтов. Глубина залегания подземных вод изменялась от 16–20 до 38 м и более.

Методы исследований

По результатам изучения свойств грунтов зоны аэрации (до глубины 15–44 м) была создана база данных, включающая 761 строку записей результатов лабораторных определений показателей свойств лессовидных грунтов из просадочных горизонтов. Количество полей (переменных) составило 73. В качестве

Abstract

The article presents results of analysis and forecast of degradation of subsidence soil properties using inductive mathematical modeling on the basis of the group method of data handling (GMDH). Some scenarios of degradation development are considered by the examples of a short time series of experimental data and a representative data sample. Analysis of factor variables depending on the inductive mathematical model type permits to sort the series by importance of indicators. The method of solution of forecast tasks on subsidence properties degradation is tested by the examples of several objects located in the zone of spread of subsiding loess of great thickness (in the territory of Nikopol in Ukraine). Statistical and dynamical degradation models that can be applied to solve the tasks on changes of subsidence properties depending on time and to determine the area of limiting states are obtained.



переменных были выбраны стандартные показатели свойств и состояния грунтов, методика определения которых за последнее время существенно не изменилась [6]. Количество записей, характеризующих состояние верхних (залегающих под почвенно-растительным слоем) нерасчлененных отложений *причерноморско-дофиновского* горизонта составило 268.

Статистический анализ показал, что по сравнению с другими городами региона нерегулярность изучения свойств зоны аэрации г. Никополя меньше влияет на неоднородность выборки. Значения коэффициента вариации, асимметричность показателей физического состояния, гранулометрического состава, механических свойств для территории г. Никополя меньше на 1–2 порядка. Величины коэффициентов ранговой корреляции указывают на слабую степень нарушения корреляционных связей. Следствием нечеткой выраженности детерминизма связей между переменными является малая достоверность моделей, созданных методами классического регрессионного анализа. Использование полиномиальной нелинейной модели (созданной методом группового учета аргументов — МГУА) для описания связи между физическими и механическими свойствами способствует большей объективности и точности прогноза, так как нелинейность в этом случае отображается. Моделирование связи относительной просадочности и ее факторов выполнено с привлечением авторского программного обеспечения [7].

Результаты исследований

Для прогноза изменений свойств массива в области природных напряжений была изучена изменчивость относительной просадочности на ступени нормального давления 0,05 МПа. Состав факторных переменных определялся по результатам анализа зависимости относительной просадочности при давлении 0,05 МПа ($S_{SL_{0,05}}$, д.ед.) от двух наборов параметров: координат (условного года от начала наблюдений t , глубины точки отбора z , м), показателей физического состояния; (2), координат и содержания фракций (типы моделей 1 и 2 в табл. 1). Так как в набор включены координаты, то особенности строения массива и изменчивости свойств в течение наблюдений заданы в неявной форме. Гранулометрический состав определялся реже, чем показатели физических свойств и просадочности, объем выборок неодинаков.

Индуктивные модели обладают сходством: имеют одинаковые порядок и количество членов полинома, подтверждена зависимость в них значений коэффициентов от координат (времени и глубины отбора). Наибольшие величины коэффициентов при линейных членах указывают на переменные, которые способствуют детерминизму модели. Факторными переменными относительной просадочности оказались показатели физических свойств: влажность на границе раскатывания ω_p (д. ед.), плотность грунта ρ (г/см³) и содержание крупной (0,25–0,1 мм) и тонкой (< 0,005 мм) фракций. В результате анализа выборки с новым набором переменных была получена модель следующего вида:

$$S_{SL_{0,05}} = 0,004\rho + 0,014\rho \cdot R_{L_{0,05}} - 0,002\rho^2 - 0,008\rho^2 \cdot R_{L_{0,05}} + 0,001t \cdot R_{L_{0,05}} - 0,001t \cdot \rho \cdot R_{L_{0,05}}, \quad (1)$$

где $S_{SL_{0,05}}$ — относительная просадочность на ступени 0,05 МПа, д. ед.; ρ — плотность грунта, г/см³; $R_{L_{0,05}}$ — содержание глинистых частиц размером менее 0,005 мм, %; t — год от начала ряда, лет.

Сходимость функций, аппроксимирующих фактические и прогнозные значения (рис. 1), в среднем достаточна. Количество записей, содержащих результаты определения фракций и относительной просадочности, достаточно для построения модели деградации просадочности методом группового учета аргументов.

Прогноз выполнялся по следующему алгоритму. На первом этапе были получены значимые модели парной регрессии между влажностью и факторными переменными. На втором был выполнен расчет прогнозных значений факторных переменных по регрессионным моделям при заданных значениях природной влажности. Было принято, что разность между влажностью полного водонасыщения и природной (начальной) является максимально возможным интервалом приращение влажности. На третьем этапе по результатам использования индуктивной математической модели (описываемой формулой (1)) был выполнен расчет прогнозных значений относительной просадочности. Максимальный срок прогноза составил 1 год, т.к. длительность ряда была 4 года. Значения глубины были заданы равными 2 м, что соответствует глубине расположения зоны просадки.

Анализ результатов (рис. 2) показывает, что деградация просадочных свойств в интервале давлений, близких к природным, при резком (аварийном) повышении влажности будет сопровождаться увеличением содержания частиц размером менее 0,005 мм и ростом

Таблица 1

Параметры моделей зависимости относительной просадочности $\epsilon_{SL_{0,05}}$ от физического состояния и гранулометрического состава*					
Тип модели	n	Коэффициенты при факторных переменных (членах полинома)**			
1. Зависимость от физического состояния: $\epsilon_{SL_{0,05}} = f(t, z, \omega_L, \omega_p, \omega, \rho_S, \rho)$	86	t	z	ω_p	ρ
		+	+	0,03	+
2. Зависимость от гранулометрического состава: $\epsilon_{SL_{0,05}} = f(t, z, R_{0,1}, R_{0,05}, R_{0,01}, R_{0,005}, R_{L_{0,005}})$	19	t	z	$R_{0,1}$	
		-0,267	-3,81	-3,809	-3,812

* n — количество членов в выборке; t — год от начала ряда; z — глубина отбора, м; ω_L — влажность на границе текучести, д.ед.; ω_p — влажность на границе раскатывания, д. ед.; ω — природная влажность, д. ед.; ρ — плотность грунта, г/см³; ρ_S — плотность частиц грунта, г/см³; $R_{0,1}, R_{0,05}, R_{0,01}, R_{0,005}$ и $R_{L_{0,005}}$ — содержание фракций гранулометрического состава с размером частиц 0,25–0,1, 0,1–0,05, 0,05–0,01, 0,01–0,005, менее 0,005 мм, %.

** Для каждой модели в верхней строке указаны используемые факторные переменные, в нижней — коэффициенты при линейных членах полинома в формуле, описывающей данную модель. Знак «+» означает, что в модели переменная присутствует как нелинейная.



Рис. 1. Графики аппроксимирующей и оптимальной (прогнозной) функций относительной просадочности $\epsilon_{SL,0,05}$ (д. ед.) при нормальном давлении 0,05 МПа, полученные по формуле (1) по данным 1989–1992 гг. для территории г. Никополя. i — порядковый номер точки в ряду

плотности. Повышение влажности до 0,2 приведет к резкому снижению просадочных свойств, а до 0,25 -- к их полной деградации. Изменения дисперсности при повышении влажности, по книге [2], являются следствием распада микроагрегатов.

По выборке большего объема (1976–2006 гг.) был выполнен прогноз значений относительной просадочности при давлении 0,05 МПа. Его срочность была определена длительностью ряда наблюдений. Прогноз был выполнен на 2016 г. Были заданы значения влажности, ограничивающие области измененного и нарушенного состояний. Полагали, что приращение влажности на 30 и 60% (от разности между влажностью

полного водонасыщения и природной влажностью) способствует переходу из одной области состояний к другой. Значения факторных переменных рассчитывали, используя заданные значения природной влажности, по моделям парной регрессии. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Модель связи относительной просадочности $S_{SL,0,05}$ и значений факторных переменных описывается следующей формулой:

$$S_{SL,0,05} = 0,03\omega_P - 0,011\omega_P \cdot \rho - 0,001z \cdot \rho + 0,021z \cdot \omega_P - 0,007z \cdot \omega_P \cdot \rho - 0,001t \cdot \rho + 0,028t \cdot \omega_P - 0,01t \cdot \omega_P \cdot \rho - 0,002t \cdot z \cdot \omega_P. \quad (2)$$

Анализ коэффициентов при линейных членах полинома показал, что наибольшее влияние на относительную просадочность $S_{SL,0,05}$ оказывает нижний предел пластичности. Глубина отбора является более важным фактором, чем год. Выбор переменной «год» в качестве фактора, знак и величина коэффициента при этой переменной указывают на развитие деградации просадочности. Перебор различных вариантов задания факторных переменных позволил получить множество моделей, указывающих на слабую зависимость просадочности от координат и ее более тесную зависимость от плотности и гидрофильности, чем от влажности и содержания пылеватых частиц.

Величина относительной просадочности $S_{SL,0,05}$ на ступенях давления, соответствующих дополнительным нагрузкам (0,3 МПа), определяется изменениями содержания иных фракций и более полным набором показателей физических свойств (табл. 3). По описанному выше алгоритму был выполнен прогноз значений $S_{SL,0,3}$ на 2016 г. для глубины 2,0 м.

Анализ результатов индуктивного прогноза величин относительной просадочности, $S_{SL,0,05}$ и $S_{SL,0,3}$ (см. табл. 3), показывает, что приращение природной влажности на 60% приведет к неравномерным деформациям. Расчет деформаций слоя мощностью 1 м производился по известной методике [5].

Произведение перемещения на заданную величину силы (0,05 и 0,3 МН) определит величину механической работы — показатель интенсивности техногенных воздействий механического подкласса [9]. Расчеты показали, что повышение влажности будет приводить к более интенсивным деформациям в объеме активной зоны. Величины деформаций в областях природных и дополнительных нагрузок будут существенно различаться. Повышение влажности на 60% приведет к полной деградации просадочности. В работе А.К. Ларионова [8] подчеркивалось, что существующие методики расчета деформаций просадки, не учитывающие сопряженность изменений дисперсности среды и развития просадочных деформаций в зоне неполного водонасыщения, дают заниженные оценки интенсивности процесса.

Для иллюстрации возможностей применения метода МГУА был выполнен прогноз максимальных деформаций просадки на конкретном примере с привлечением материалов изысканий, выполненных для проектирования комплекса жилых зданий в северо-восточной части г. Никополя в 1989 г. В основаниях этих сооружений присутствуют *причерноморско-дофиновские, бугские и прилукско-кайдакские* лессовидные от-

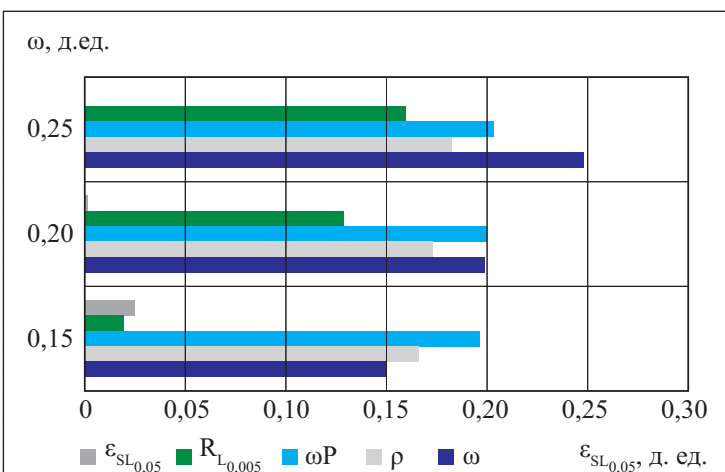


Рис. 2. Прогнозные значения функции $S_{SL,0,05}$ (ось абсцисс) и факторных переменных (ось ординат) при различных значениях природной влажности ω (ось ординат). Значения показателей приведены к одному масштабу. Поправочные коэффициенты составили: 10 для $S_{SL,0,05}$; 0,01 для $R_{L,0,005}$; 0,1 для ρ



ложения, уровень грунтовых вод на момент изысканий находился на отметках 16-20 м, мощность зоны уплотнения, по результатам расчетов, не превышала 10 м, зоны просадки — 5 м.

Прогноз максимальных деформаций причерноморско-дофиновского горизонта мощностью 5 м был выполнен для двух обычно рассматриваемых ситуаций — для «мгновенного» обводнения или для длительного изменения влажности просадочных грунтов при одновременном действии давления. Изменения свойств грунта в процессе деградации не учитывались. Использование индуктивного моделирования позволяет рассмотреть эти и другие варианты развития событий, учитывая сопряженность изменения свойств. Так, в первом варианте расчета предполагалось, что изменение влажности сопровождается изменением плотности грунта. Второй сценарий учитывает связь приращений влажности и изменений физико-химических свойств. Были рассчитаны значения относительной просадочности на стадиях малых (30% от возможных приращений) и средних (60%) приращений влажности в областях напряжений, близких к природным (0,05 МПа) и дополнительным (0,3 МПа) с использованием созданной индуктивной модели (рис. 3).

Прогнозные значения факторных переменных модели были получены по значимым уравнениям парной регрессии (плотность присутствовала во всех вариантах, остальные переменные — во втором варианте) или приняты равными выборочным средним. Величина максимальной деформации просадки, реализованная за счет повышения влажности при определенной величине давления и необходимая для расчета механической работы, была найдена как разность максимальных суммарных просадок для слоя мощностью 5 м:

$$\Delta S_{SL} = S_{SL_0} - S_{SL_1}, \quad (3)$$

где ΔS_{SL} — реализованная деформация горизонта, м; S_{SL_0} — суммарная просадка в состоянии начальной влажности, м; S_{SL_1} — суммарная просадка расчетного слоя в прогнозном состоянии.

Суммарная просадка рассчитывалась по методике [5] (с. 38), связывающей мощность горизонта, величину относительной просадочности (в данном случае при давлении 0,3 МПа) и значение деформации просадки:

$$S_{SL} = \sum_{i=1}^k [(\epsilon_{SL_{0,3}})_i \cdot m_i], \quad (4)$$

где S_{SL} — суммарная максимальная просадка, м; $(\epsilon_{SL_{0,3}})_i$ — относительная просадочность i -го расчетного слоя при давлении 0,3 МПа; k — количество слоев; m_i — мощность расчетного слоя.



Таблица 2

Выборочные параметры моделей зависимости относительной просадочности от физического состояния, координат, гранулометрического состава*								
Тип модели	n	Коэффициенты при факторных переменных (членах полинома)*						
$\epsilon_{SL_{0,05}} = f(t, z, \omega_L, \omega_P, \omega, \rho_S, \rho)$	132	t	z	ω_L	ω_P	ω	ρ_S	ρ
		+	-	0,076	-	-	-0,01	0,064
$\epsilon_{SL_{0,05}} = f(t, z, R_{0,1}, R_{0,05}, R_{0,01}, R_{0,005},)$	33	t	z	$R_{0,1}$	$R_{0,05}$	$R_{0,01}$	$R_{0,005}$	$R_{L_{0,005}}$
		-	0,003	-	0,003	-	0,002	-
$\epsilon_{SL_{0,05}} = f(t, z, R_{0,1}, R_{0,05}, R_{0,01}, R_{0,005}, R_{L_{0,005}})$	31	t	z	ω_L	ω	ρ_S	ρ	$R_{0,05}$
		0,001		0,019	-0,068	-	0,007	0,003

* Расшифровку обозначений и пояснения по структуре таблицы см. в примечаниях к табл. 1.

Таблица 3

Прогноз деформаций при деградации просадочности (при периоде наблюдений 60 лет)					
Давление, МПа	Приращение влажности, %	Начальное среднее значение ϵ_{SL} , д.ед.	Прогнозное значение ϵ_{SL} , д.ед.	Деформация просадки, м	Механическая работа, кДж
0,05	30	$\epsilon_{SL_{0,05}} = 0,007$	0,0020	0,0050	0,25
	60		0,0000	0,0070	0,35
0,30	30	$\epsilon_{SL_{0,3}} = 0,062$	0,0596	0,0024	0,72
	60		0,0000	0,0620	18,60

Таблица 4

Результаты прогноза относительной просадочности причерноморско-дофиновского горизонта при повышении его влажности*					
P , МПа	Сценарий**	$\varepsilon_{SL0,3}$, д.ед.	S_{SL} , м	ΔS_{SL} , м	A , кДж
0,05	0	0,012	0,060	0,000	0,0
	1	0,012	0,060	0,000	0,0
0,3	0	0,093	0,465	0,000	0,0
	1	0,036	0,180	0,285	85,5
	2	0,000	0,000	0,465	139,5

* P — давление; $\varepsilon_{SL0,3}$ — относительная просадочность причерноморско-дофиновских отложений при давлении 0,3 МПа; ΔS_{SL} — изменение суммарной максимальной просадки горизонта в результате повышения влажности при заданном давлении; A — механическая работа в объеме активной зоны.
 ** 0 — начальное состояние, деградации нет; 1 — «мгновенное» изменение плотности с «мгновенным» изменением влажности, 2 — изменения физического состояния, физико-химических свойств и дисперсности в зависимости от приращений влажности.

В интервале природных напряжений увеличение влажности на 30% не приведет к изменению состояния — прогнозные значения относительной просадочности оставались близкими к выборочным средним (табл. 4). В границах активной зоны при давлении 0,3 МПа произойдет частичная или полная деградация просадочности в зависимости от интенсивности процесса. При аварийном обводнении относительная просадочность уменьшается меньше, чем при медленном увеличении влажности, сопровождаемом сопряженными изменениями свойств.

Заключение

Величина просадки в основании сооружения при действующих дополнительных и бытовых напряжениях, рассчитанная по стандартной методике [3], составит 5,1 см.

По результатам индуктивного моделирования в случае аварийного «мгновенного» повышения влажности при величине давления 0,3 МПа в объеме расчетного слоя мощностью 5 м в 2016 году «мгновенная» суммарная просадка составит не менее 28,5 см.

Максимальная суммарная просадка, рассчитываемая при условии полной деградации просадочности, определяется начальными условиями. Ее величина одинакова при разных методах прогноза.

Полная деградация просадочности в условиях медленного повышения влажности, сопровождаемого изменениями физико-химических свойств и дисперсности, приведет к наибольшей механической работе в объеме активной зоны.

Преимуществом использования индуктивного моделирования является возможность прогнозирования различных сценариев развития неблагоприятных ситуаций на основе более реалистичных оценок. Нормативная же методика оценки просадочности, по мнению

некоторых исследователей [5, 8, 10], дает искаженные результаты.

Использование метода группового учета аргументов позволяет создать модель поведения системы с плохо выраженным детерминизмом на основании привлечения данных о деградации просадочных свойств массива лессовых грунтов в однородных по инженерно-геологическим признакам условиях.

Несоответствие интенсивности процессов деградации лессовой формации на территории г. Николая и в зонах влияния других городских природно-технических систем региона было установлено в процессе стохастического анализа и подтверждено при индуктивном моделировании.

Метод группового учета аргументов позволяет получить статические и динамические модели изменчивости состояния среды в зоне техногенеза на разных уровнях выделения объектов. Область применения статической модели — решение задач классификации и прогноза по предельным состояниям. Варьируя значения факторных переменных, можно определить область допустимых величин просадочности. Динамические модели необходимы для решения задач о деградации свойств просадочных грунтов во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ампилов В.Е. Закономерности формирования режима грунтовых вод в районах горнорудных предприятий Никопольского марганцеворудного бассейна // Инженерная геология. 1990. № 4. С. 35–41.
2. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М: Изд-во МГУ, 1997. 635 с.
3. ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування, проектування і територіальна діяльність / Від 2008-07-01. Міністерство будівництва України, 2008. 74 с.
4. Инженерная геология СССР. Платформенные регионы Европейской части СССР. Т. 1 / под ред. И.С. Комарова, Д.Г. Зилунка, В.Т. Трофимова. М: Недра, 1992. 357 с.
5. Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. К.: Будівельник, 1982. 224 с.
6. Мокрицкая Т.П. Изменчивость свойств перигляциальной формации в районах горной промышленности на примере Криворожского железорудного бассейна (Украина) // Вестник ИГТУ. 2013. № 5. С. 65-72.
7. Мокрицкая Т.П., Корякина Л.С. Факторы и модели деградации просадочности // Науковий вісник НГУ. 2013. № 4 (136). С. 5-10.
8. Ларионов А.К., Приклонский В.А., Ананьев В.П. Лессовые породы СССР и их строительные свойства. М: Госгеолтехиздат, 1959. 367 с.
9. Трофимов В.Т. Теория и методология экологической геологии. М.: Изд-во МГУ, 1997. 368 с.
10. Юрченко С.Г., Будикова А.М. Методика расчета ожидаемой совместной просадочной деформации гидротехнических сооружений и их лессовых оснований с учетом области замачивания // Вестник ТГАСУ. 2008. № 2. С. 170–180.