

УДК 556.06:504.05/.06

**И.А. Садовенко**, доктор техн. наук, профессор

**Е.О. Подвигина**, канд. техн. наук, доцент

**А. Н. Загриценко**, канд. техн. наук, доцент

Государственное ВУЗ “Национальный горный университет”

пр. К. Маркса, 19, Дніпропетровськ, 49005, Україна

## ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ФАКТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОГЕННО НАГРУЖЕННЫХ ЛЕССОВЫХ СКЛОНОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Методом численного моделирования геофильтрации количественно оценена роль природных и техногенных факторов в формировании гидродинамического режима подземных вод, нарушение которого определяет в отдельных зонах условия развития механической суффозии и активизации оползневых процессов.

**Ключевые слова:** численное моделирование, баланс, суффозия, устойчивость.

### ВВЕДЕНИЕ

В пределах грунтовых лессовых склонов существуют природные предпосылки для развития негативных инженерно-геологических процессов, однако активизация их развития, концентрация, частота и масштабы определяются действием факторов техногенного происхождения.

Основным видом техногенной нагрузки склоновых частей городских агломераций является плотная многоэтажная застройка территории и соответственно интенсивная эксплуатация всех типов водонесущих коммуникаций. Проектные строительные нормативы, недостаточно учитывающие специфику несущих свойств лессовых грунтов и их возможные изменения, а также нарушения планировки застройки, поверхностного водоотвода и неконтролируемые утечки из водонесущих коммуникаций приводят к возникновению техногенных аварий. Так на территории ж/м “Тополь-1” в г. Днепрпетровске заключительная фаза аварии (июнь 1997 г.) проявилась в виде глубинной эрозии, перешедшей в крупномасштабный оползень-течение. В результате разрушены 9-ти этажный жилой дом, школа и частично два детских комбината. Объем оползневых масс составил 4,5 тыс. м<sup>3</sup>.

Период между техногенной аварией и настоящим временем характеризуется протеканием инженерно-геологических процессов, которые относятся к накопительной (негативной) фазе, предшествующей оползневым явлениям (локальная суффозия, эрозионные явления, ступенчатые оседания грунтов, деформации зданий). Они зафиксированы на смежном с оползневым участке в пределах жилого массива «Тополь-2».

Поэтому **целью** данной работы является обоснование первоочередных мероприятий по предупреждению и ликвидации локальных техногенных источников развития оползневых процессов.

Поскольку наиболее динамичным фактором, который способен активизировать развитие оползневых процессов, является нарушение гидродинамического режима территории, возникла необходимость решения *следующих задач*:

– количественно оценить степень влияния природной и техногенной составляющей в формировании гидродинамического режима территории исследований на основе численного моделирования процессов геофильтрации;

– выявить зоны формирования критических источников развития механической суффозии, как одного из факторов развития и активизации оползневых процессов.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях количественной неопределенности и многофакторности условий формирования процессов использован метод численного математического моделирования, основанный на решении основного дифференциального уравнения фильтрации (1) итерационными методами с использованием системы конечно-разностных уравнений [1].

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + W + Q_p + Q_n = m \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $H$  – искомая функция напора;  $T_x$ ,  $T_y$  – проводимость водоносного горизонта в направлении  $x$  и  $y$ , соответственно;  $W$  – величина инфильтрации;  $Q_p$  – единичный расход, отражающий взаимосвязь с рекой;  $Q_n$  – единичный расход, характеризующий взаимосвязь водоносных горизонтов через слабопроницаемые разделяющие слои;  $\mu$  – упругая водоотдача;  $t$  – время.

Исследуемая территория приурочена к водоразделу рек Мокрая Сура-Днепр и интенсивно прорезана овражно-балочной сетью. Жилые массивы «Тополь-2, 3» непосредственно расположены на левом склоне балки Встречная, где перепад абсолютных отметок дневной поверхности составляет около 40,0 м (рис. 1).

Моделируемая область площадью 2,36 км<sup>2</sup> аппроксимирована сеточной областью с шагом 20 м и в вертикальном разрезе представлена двухслойной водоносной толщей четвертичных и неогеновых отложений. На внешнем контуре модели зона питания по линии водораздела и естественные дрены в балках отображены граничным условием III-го рода ( $H=const$ ), по линиям тока задано граничное условие II-го рода с нулевым расходом ( $Q=0$ ), а на участках притока подземных вод со стороны сопредельных территорий  $Q=const$ .

Идентификация математической модели и объекта исследований осуществляется в два этапа, где на первом устанавливается их физическое соответствие, а на втором – динамическое.

Воспроизведение на модели уровня поверхности и баланса подземных вод (табл. 1) в стационарной постановке на период до застройки жилых массивов близко к фактическому, зафиксированному первыми инженерно-геологическими изысканиями [2]. Уровень грунтовых вод в ненарушенных условиях формировался на глубинах от 20 до 28 м.

Решение вариантного ряда нестационарных обратных задач позволило сформировать полную ретроспективную картину динамики формирования уровня режима подземных вод (1973-2012 гг.) и количественно оценить основные факторы его формирования.

Периоды 1973-1997 гг. и 1997-2012 гг. характеризуются инверсией режима подземных вод грунтового водоносного горизонта, соответственно подъемом и понижением уровня.

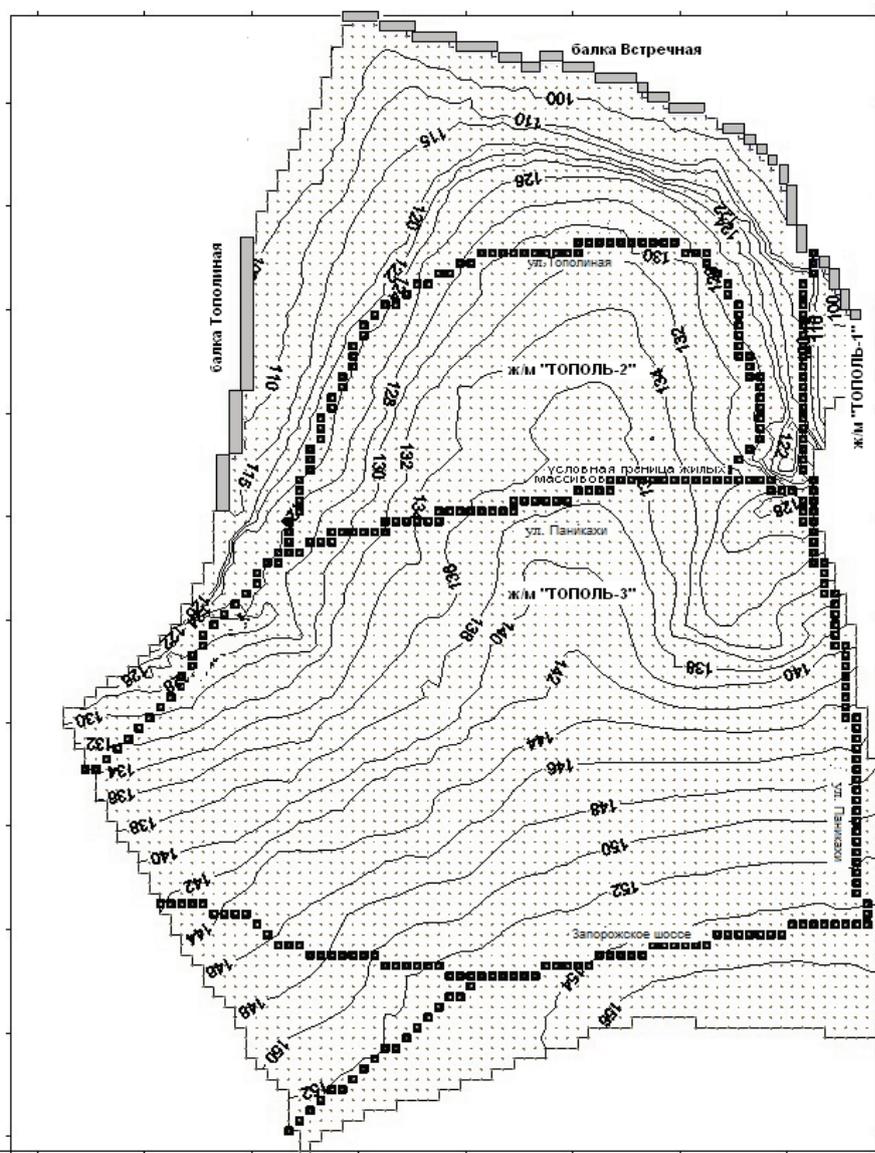


Рис. 1. Гипсометрия дневной поверхности исследуемой территории

Так в период с 1973 по 1997 гг. зафиксирован скачкообразный неравномерный по площади подъем уровня подземных вод на 20 м в грунтовом горизонте и на 23 м – в неогеновом. Наиболее интенсивный рост уровня со скоростью 0,95-2,25 м/год характерен для 1980-1990 гг. Результатами моделирования подтверждено, что формирование зон интенсивного увлажнения и увеличение скорости подъема уровня подземных вод, определяется составляющей инфильтрационного питания (табл. 1), величина которой увеличилась на порядок с 71,2 м<sup>3</sup>/сут до 740 м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 1

## Изменение балансовых составляющих во времени

Приходные элементы	м <sup>3</sup> /сут				Расходные элементы	м <sup>3</sup> /сут			
	1973	1989	1991	1997		1973	1989	1991	1997
Слой 1									
Инфильтрационное питание	71,2	841,8	1011,5	740	Переток в неогеновые пески	93,3	216,4	215,7	190,3
Приток на внешнем контуре	44,3	23,4	23,9	19,3	Разгрузка в б. Тополиная	11,3	6,6	6,5	8,5
					Испарение	9,1	80,7	87,6	114,4
					Высачивание	0,6	324,3	366,5	456,5
Емкостная составляющая	0	0	0,3	20,8	Емкостная составляющая	1,1	237,4	358,6	10,3
<b>Всего</b>	<b>115,5</b>	<b>865,2</b>	<b>1035,7</b>	<b>880,1</b>	<b>Всего</b>	<b>115,4</b>	<b>865,4</b>	<b>1034,9</b>	<b>880,0</b>

Тесная корреляционная связь между данными режимных наблюдений и отметками уровня на модели свидетельствуют об адекватности реакции модели на определенные изменения в геологической среде (рис. 2).

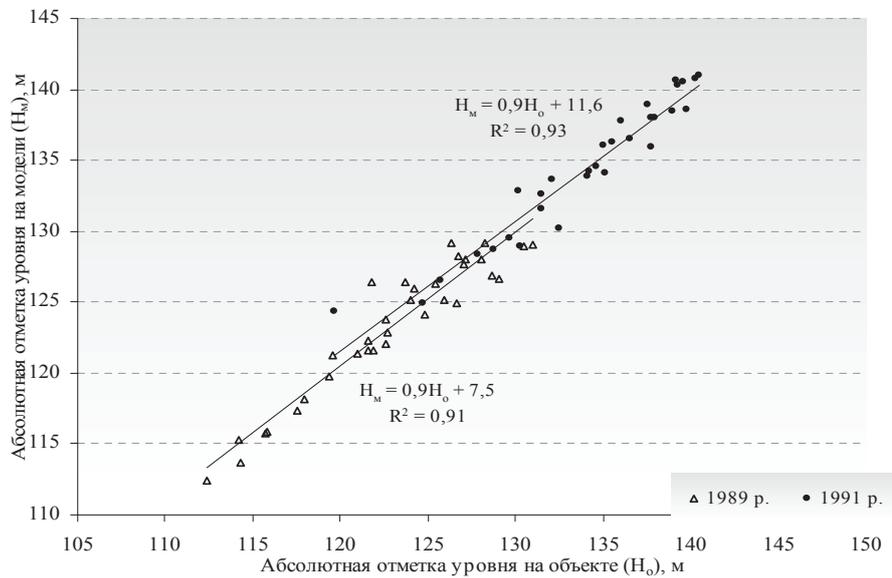


Рис. 2. Соответствие модели и объекта исследований по положению уровня грунтовых вод на 1989 и 1991 гг.

Инверсия режима подземных вод (понижение уровня) четвертичного водоносного горизонта в период с 1997 по 2012 гг. является реакцией массива на формирование пониженного базиса дренирования в оползневой зоне и последующие инженерные мероприятия [3]. Снижение уровня грунтовых вод на 3,0-9,0 м зафиксировано фактическими данными и подтверждено результатами моделирования (рис. 3). При этом приходная составляющая водного баланса за счет инфильтрационного питания уменьшилась на 40%.

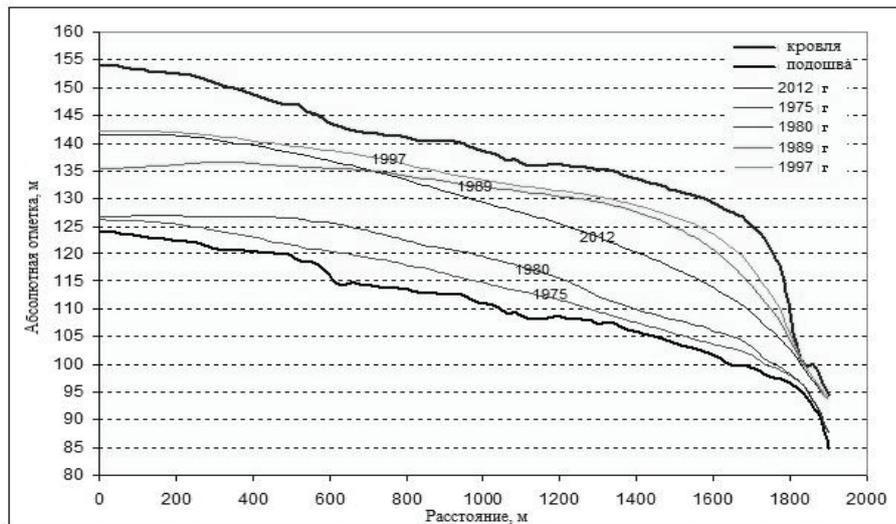


Рис. 3. Изменение уровня режима подземных вод в многолетнем разрезе

Поскольку в задачу настоящих исследований входит количественная оценка доли природной и техногенной составляющей водного баланса, то поле природного инфильтрационного питания (от 10 до 65 мм/год) выделено с учетом глубины залегания уровня грунтовых вод и рельефа местности.

Техногенная составляющая инфильтрации (0-200 мм/год) тесно коррелирует с плотностью застройки и водонесущих коммуникаций, утечками в зависимости от диаметра, материала и режима работы коммуникаций.

Установлено, что величина техногенного питания в балансе водоносного горизонта четвертичных отложений составляет 335,7 м<sup>3</sup>/сут, что почти втрое больше естественного (120,5 м<sup>3</sup>/сут). Из этого следует, что основным фактором формирования уровня поверхности грунтовых вод во времени является составляющая инфильтрационного питания, которая почти на 75% определяется величиной техногенной инфильтрации (табл. 2).

На основании натурного обследования и результатов моделирования гидродинамического режима формирования уровня поверхности подземных вод территория районирована по степени опасности проявлений и активизации негативных инженерно-геологических процессов.

Наиболее опасной по возможности развития процесса суффозии, перехода ее в глубинную эрозию и формирования оползня-течения является площадь грунтового склона с максимальными градиентами фильтрации в четвертичном водоносном горизонте, наибольшей плотностью водокоммуникационных сетей и величиной инфильтрационного питания в пределах 150-270 мм/год.

Таблица 2

**Баланс подземных вод состоянию на 2012 год**

Приходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут		Расходные элементы баланса, м <sup>3</sup> /сут	
Слой 1			
Естественное инфильтрационное питание	120,5	Переток в неогеновые пески	114,9
Техногенное инфильтрационное питание	335,7		
Приток из ручья в б. Встречная	3,18	Разгрузка в ручей б. Тополиная	7,7
Переток через подошву	0,8	Испарение	116,9
Емкостная составляющая	7,1	Высачивание	243,6
Приток на внешнем контуре	16	Емкостная составляющая	0,1
<b>Всего</b>	<b>483,28</b>	<b>Всего</b>	<b>483,2</b>

К этой же зоне относятся поверхности застроенных склонов с воронковидными и оврагообразными формами техногенного рельефа и засоренным базисом дренирования в руслах балок. Глубина залегания уровня грунтовых вод здесь существенно зависит от условий фильтрации к зоне разгрузки, дополнительных источников техногенной инфильтрации из поврежденных ливневых сетей, наличия искусственных препятствий на пути поверхностного стока, а именно: а) гидравлического сопротивления засоренных и заиленных русел балок; б) искусственных воронкообразных понижений рельефа в) бессточных оврагов и отрывов, формирующихся при ненадлежащей застройке гаражей. Границы этой зоны определяются суммой двух составляющих: 1) расстоянием от тальвегов балок до подошвы склонов, 2) расстоянием от подошвы склонов до верхнего контура инфильтрационного питания в пределах 150-270 мм/год.

**ВЫВОДЫ**

Дифференциация факторов, способствующих нарушению устойчивости техногенно нагруженных лессовых склонов, и их количественная оценка позволили выявить критические источники формирования механической суффозии с переходом в глубинную эрозию и рекомендовать следующие предупредительные мероприятия в наиболее опасной зоне:

- проведение инженерно-технического мониторинга с периодичностью обследования дважды в год (в конце мая и ноября), содержащего оценку состояния поверхностного стока, ливневой сети, наличия искусственных водосборных воронок и оврагов в рельефе, и данных относительно появления суффозионных конусов выноса, а также интенсификации деформаций на зданиях различного назначения;
- прекращение строительных и земляных работ, которые замедляют поверхностный сток и разгрузку воды в тальвеги балок Встречная и Тополиная, формируют водосборные воронки и овраги;

• составить и реализовать проект реконструкции водонесущих сетей с ликвидацией искусственных водопоглощающих воронок и оврагов в рельефе. Ремонт ливневых коммуникаций рекомендуется проводить в направлении поднятия рельефа, начиная с балок.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакин Е. А. Численное моделирование геофильтрации. / Е.А.Ломакин, В.А. Мироненко, В.М. Шестаков. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
2. Заключение об инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства 16-ти этажных жилых домов на территории жилого массива “Тополь-3” в г. Днепропетровске / Игрунова М.А. и др. – УкрвостокГИИНТИЗ, 1975. – 62 с.
3. Білокопитова Н. А. Оцінка надійності проектних заходів щодо захисту території житлового масиву “Тополя-1” від підтоплення / Н.А. Білокопитова, Г.П. Кузіна, Г.М. Лейко та ін. // Мінеральні ресурси України. – 1998. – №3. – С. 38-43.

Статья поступила в редакцию 20.06.2013

**І. О. Садовенко**, доктор техн. наук, професор  
**Е. О. Подвігіна**, канд. техн. наук, доцент  
**А. Н. Загриценко**, канд. техн. наук, доцент  
кафедра гідрогеології та інженерної геології  
Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»  
пр. К. Маркса, 19, Дніпропетровськ, 49005, Україна

### ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ФАКТОРІВ СТІЙКОСТІ ТЕХНОГЕННО НАВАНТАЖЕНИХ ЛЕСОВИХ СХИЛІВ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

#### Резюме

Методом чисельного моделювання геофільтрації кількісно оцінена роль природних і техногенних факторів у формуванні гідродинамічного режиму підземних вод, порушення якого визначає в окремих зонах умови розвитку механічної суфозії і активізації зсувних процесів.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, баланс, суфозія, стійкість.

**I. A. Sadovenko**, doctor of engineering sciences, professor  
**E. O. Podvigina**, PhD engineering sciences, associate professor  
**A. N. Zagritsenko**, PhD engineering sciences, associate professor  
Department of Hydrogeology and Engineering Geology  
State higher education institution  
“National Mining University”  
Karl Marx Prospect, 19, Dnepropetrovsk, 49005, Ukraine

**DIFFERENTIATION FACTORS OF STABILITY OF LOESS SLOPES  
OF ANTHROPOGENIC DISTURBED BY MATHEMATICAL  
MODELING OF FILTRATION PROCESSES**

**Summary**

The role of natural and anthropogenic factors in the formation of the hydrodynamic regime of underground water was estimated. Field of mechanical suffusion and activation of landslide processes is determined by mathematical modeling of groundwater filtration.

**Keywords:** numerical simulation, balance, suffusion, stability.