

**ОСТРОВЕРХ БОРИС МИКОЛАЙОВИЧ**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

Основні напрямки наукової діяльності: чисельне моделювання процесів формування напружено-деформованого стану ґрунтових структур та оцінка стійкості конструкцій гідротехнічних споруд на ґрунтових основах; моделювання тектонічних явищ для оцінки сейсмостійкості масивних споруд та виникнення сейсмічних хвиль; створення та аналіз баз даних з використанням геоінформаційних систем.

Автор более 90 научных работ

E-mail: ostro@ukr.net

**САВИЦЬКИЙ ОЛЕГ АНАТОЛІЙОВИЧ**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки Національної академії наук України, член Українського общества механики грунтов, геотехники и фундаментостроения

Основні напрямки наукової діяльності: динамічні просторові контактні задачі для штампів і плит (моделей фундаментів та споруд) на основі, яка моделюється динамічними моделями ґрунтового середовища (шарувате в'язкопружне, пористопружне насичене рідиною) при дії силових та сейсмічних навантажень; взаємодія конструкцій морських гравітаційних платформ, що взаємодіють з ґрунтовою основою та водою під дією техногенних та природних навантажень; чисельне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового середовища.

Автор более 50 научных работ.

E-mail: osavitsky@ukr.net

**РЕВА ТАМАРА ЛЕОНІДІВНА**

Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки Національної академії наук України

Основні напрямки наукової діяльності: розробка математичних методів дослідження механіки ґрунтів, проблем стійкості схилів, пружно-пластичних задач.

Автор более 20 научных работ.

**ЛИТВИНЕНКО ОЛЕНА РОМАНІВНА**

Інженер-еколог інституту гідромеханіки Національної академії наук України

Основні напрямки наукової діяльності: чисельне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів, руслових процесів із застосуванням ІС-технологій.

**СІДЬКО МАРІЯ ІВАНІВНА**

Провідний інженер-фізик інституту гідромеханіки Національної академії наук України

Основні напрямки наукової діяльності: Моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового середовища при динамічних діях.

УДК 551.509 : 624.131

**РУХ ТА НАПРУЖЕНИЙ СТАН СХИЛІВ ТА УКОСІВ**

*Ключові слова: стійкість схилів, зв'язані слабо стисливі в'язкі ґрунти, напружено-деформований стан, метод скінченних різниць*

*З метою аналізу зсувного процесу в схилах та укосах з м'яких ґрунтових матеріалів використовується лінійна модель Ньютона в'язкої слабо стисливої рідини. Розглядається задача про рух шару однорідного ґрунту постійної товщини під дією власної ваги і досліджується вплив кута нахилу схилу відносно горизонтальної вісі на напружений стан та розподіл швидкостей деформацій. Задача розв'язується методом скінченних різниць.*

*С целью анализа процесса сдвига в склонах и откосах из мягких грунтовых материалов используется линейная модель Ньютона вязкой слабо сжимаемой жидкости. Рассматривается задача о движении слоя однородного грунта постоянной толщины под действием собственного веса и исследуется влияние угла наклона склона относительно горизонтальной оси на напряженное состояние и распределение скоростей деформаций. Задача решается методом конечных разностей.*

*Aiming the purpose of the soft soil slopes and declivities shear analysis we used linear model of Newton viscous feebly compressible liquid. We consider the problem of movement of layer of homogeneous subsoil of constant thickness under the influence of its own weight and the influence of the angle of the slope on the horizontal axis on the stressed state and distribution of strain rate. The problem is solved by the finite difference method.*

Досвід спостережень природних явищ свідчить про те, що в ґрунтових масах під дією навіть малих навантажень на протязі тривалого часу, що має місце, наприклад, на виположених схилах, здатні розвиватися зростаючі деформації [1, 2, 3]. Звичайно, їх швидкість руху досить невелика – десятки або навіть менше сантиметрів на рік, що не помітно і не становить небезпеки. Але вона може раптово підвищуватись у багато разів після спрацьовування спускових механізмів (перезволоження, землетруси), які змінюють структуру, консистенцію та несучу здатність ґрунтів.

Як наслідок, виникає зсув на схилі, і навіть руйнування схилу. Найбільшим зсувом історичного часу вважається зсув, що відбувся в 1911 році на Памірі на території Таджикистану. Сильний землетрус викликав гігантський зсув обсягом 2,5 км<sup>3</sup> м'якого матеріалу. Був завалений кишлак Усой з його 54 жителями, зсув перегородив долину ріки Мургаб і утворив підгатне озеро. Воно стало рости й затопило кишлак Сарез. Висота цієї природної греблі складає близько 300 м, а максимальна глибина озера та довжина постійно збільшуються. Озеро, що утворилося, назване Сарезським [4] і на даний момент становить суттєву загрозу місцевості. В роботі [5] опи-



саний випадок 1963 р., коли при заповненні водосховища з арковою греблею Вайонт (Італія) було знехтувано свідцтвами зсувів, які траплялися тут раніше, та про раптове збільшення швидкості деформації бортів, пов'язане зі зволоженням ґрунтів в основі схилів. Внаслідок цього під час потужної зливи та незначного землетрусу, стався зсув скального ґрунту об'ємом 270 млн. м<sup>3</sup> та утворення хвилі води, що перекотилася через греблю з відповідними трагічними наслідками. З числа недавніх зсувів, в роботі [6] досліджується руйнування лесових схилів поблизу Душанбе (Таджикистан) при комплексній дії води, зменшення коефіцієнту фільтрації з глибиною та сейсмічної вібрації, що призвело до зсувів та потоків ґрунту у вигляді селя. Наведені випадки свідчать про можливість утворення значних зсувів, що не мають форми зсуву по класичній круговій циліндричній поверхні, а подібні до форми в'язкої течії з відривом и наступного ковзання масиву ґрунту на великі відстані.

Як показує аналіз досліджень, ступінь зсувної небезпеки зростає майже в прямій залежності від наявності глинистих компонент у породі та їх консистенції [3]. У цьому аспекті дослідження зсувного процесу найбільший інтерес становлять глинисті (зв'язані) породи. У цей клас входить широкий спектр ґрунтів – від супісків до твердих (гідростійких) глин. Деформації, що виникають в ґрунті, в силу свого незатухаючого характеру й крайньої повільності розвитку, звичайно вважають пластичними. Згідно з спостереженнями, зсуви величиною 1–2 см на рік для вільного схилу не представляють небезпеки. Однак положення різко змінюється, коли поблизу схилу є ті або інші споруди. Як показує досвід будівництва, навіть такі повільні зсуви можуть виявитися досить небезпечними для міцності та стійкості берегових опор гребель та мостів (зсувний тиск), справної роботи затворів (затискання й перекося), напірних трубопроводів (вигин, скривлення), споруджень на дериваційних каналах і, нарешті, напірних басейнів. Як ілюстрація, наприклад, в роботі [3] розглядається головна споруда гідроелектричної станції, що опинилася під дією потужного бічного тиску мас, які досить повільно оповзали береговим схилом у вигляді величезної кількості роздрібненої й зруйнованої вивітряними породи. Ці маси у вигляді шару потужністю до 60 м залягали на зміщеному елювії третинних пелітових туфів, які також брали участь у зсувному русі. Середня швидкість переміщення мас за вимірами на поверхні не перевищувала 2 см у рік. Але, незважаючи на такий, здавалося б, досить незначний і повільний зсув мас породи, головна споруда була значно деформована, через що експлуатація її була поставлена під загрозу. Для запобігання руйнування будівлі були вжиті термінові, досить складні та дорогі заходи.

Глинисті породи (за виключенням твердих метаморфізованих) займають проміжне положення між в'язкими рідинами та пружними твердими тілами. Внаслідок фізико-хімічних процесів, що відбуваються, наприклад, у випадку підвищення чи зменшення вологості породи, руйнування структури внаслідок дії навантажень чи розвантаження, глинисті ґрунти змінюють консистенцію, тобто, в якості в'язкої рідини, міняють параметри в'язкості (коефіцієнт в'язкості) і швидкість течії. У випадках розрідження більш грубі мінеральні частинки, що входять до складу порід, опиняються ніби утопленими чи навіть плаваючими у в'язкому водно-колоїдному розчині, що утворився [3]. У такому стані сили внутрішнього тертя та структурного зчеплення майже не проявляються, а опір зсуву ґрунтів буде обумовлений лише силами в'язкості.

Таким чином, підготовчі етапи та рух по схилу супроводжуються зміщенням типу течії, і для аналізу масового обвалу ґрунтових матеріалів використовуватимемо модель в'язкої рідини [1, 3, 9]. При цьому швидкість течії може бути як дуже повільною, так і досить значною в залежності від коефіцієнту в'язкості ґрунту, який суттєво залежить від вологості та структурного стану ґрунтів.

Найпростішою моделлю течії в'язких (реальних) рідин є лінійна модель ньютонівської рідини [1, 9], яка входить складовою до багатьох нелінійних реологічних моделей, що використовуються для розв'язку задач стійкості схилів з м'яких ґрунтових матеріалів (тіла Бінгама, Кельвіна, Максвела та інших моделей пластичної деформації [9, 10]). На даному етапі розробки методики розв'язання та дослідження проблеми обираємо узагальнену модель Ньютона. Як відомо, використання цієї моделі призводить до нелінійних рівнянь Нав'є-Стокса [8, 11]. Маючи на увазі вирішення достатньо складних задач реальних об'єктів ґрунтових схилів та укосів розв'язуватимемо складену систему рівнянь чисельним різницею методом усталення нестационарного процесу, рідину вважатимемо слабо стисливою. Для дослідження перехідних та усталених процесів деформування створено явну схему методу кінцевих різниць на базі схем типу Лакса і Дюффорта-Франкеля з швидкостями вперед за часом [11].

В якості прикладу використання програм, що розроблені, розглянемо задачу про рух шару однорідного ґрунту постійної товщини під дією власної ваги і проаналізуємо вплив кута схилу на напружений стан та на розподіл швидкостей деформацій. Для аналізу деформованого стану з метою наочності розглянемо топографічний ґрунтовий суглинковий масив довжиною  $l=600$  м і товщиною  $h=80$  м; що включає схил з перепадом висоти 15 м. Масив апроксимуємо сітковою областю  $20 \times 16$  вузлів.

Для моделювання швидкості руху поверхні, що

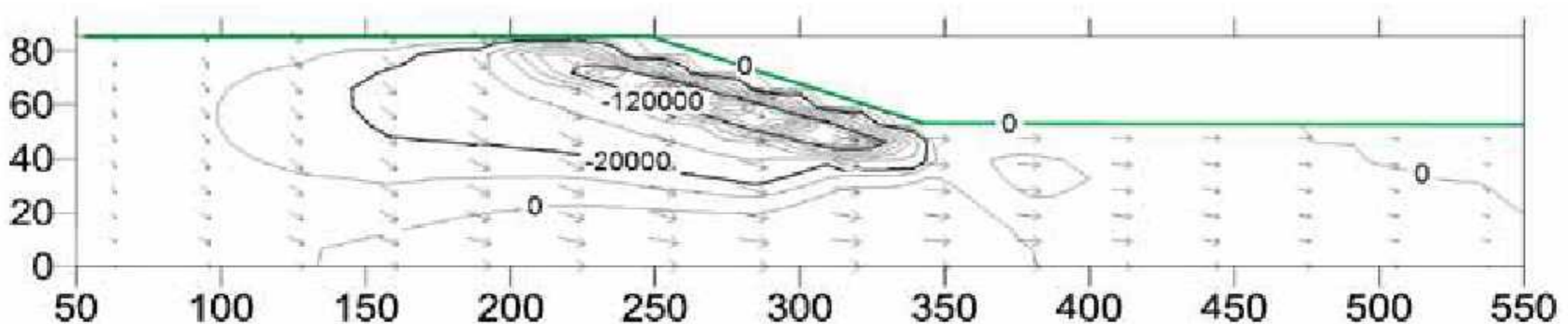


Рис. 2. Вигляд руху (поле швидкостей – стрілки) та напруженого стану ( $\tau_{xy}$ , Па) ґрунту на схилі з кутом  $\alpha=17^\circ$  під дією власної ваги. Максимальна швидкість  $V=50$  см/рік.



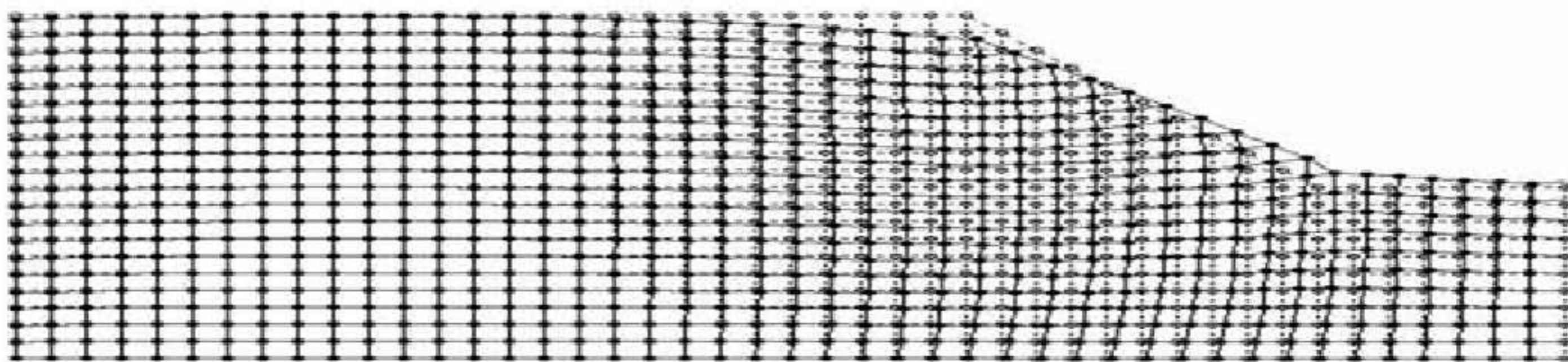


Рис. 4. Вигляд деформації області під дією власної ваги при  $\alpha=22^\circ$  після 200 років (пунктир – недеформований стан)

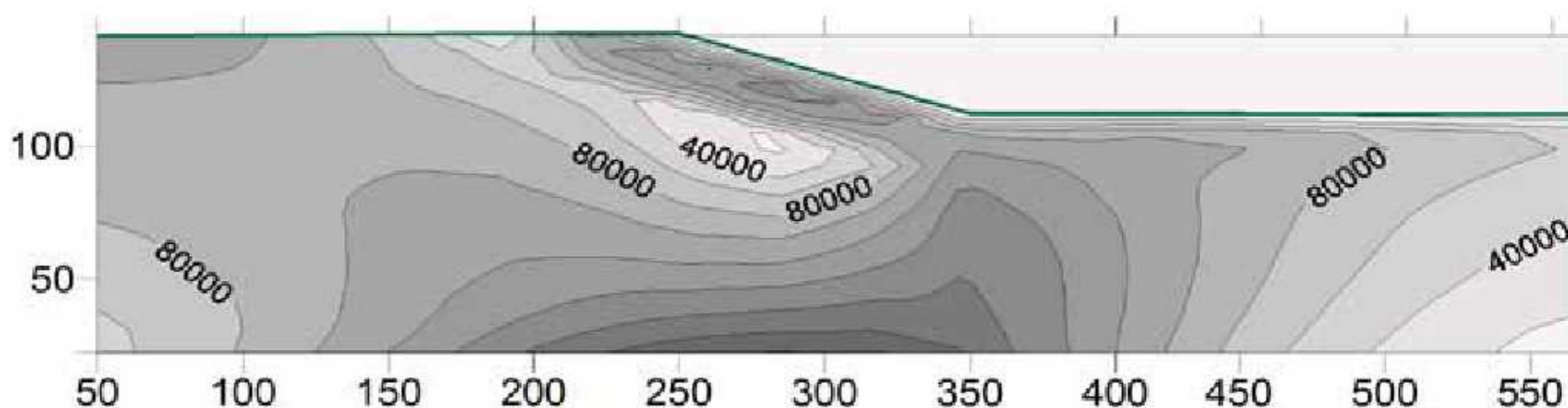


Рис. 5. Вигляд напруженого стану ґрунту під дією власної ваги для схилу з кутом  $\alpha=17^\circ$ . Максимальні дотичні напруги  $T_{\text{MAX}}$ , Па.

відповідає природним умовам, а саме приблизно 10...20 см/рік [3] (число Рейнольдса  $Re=1.8 \cdot 10^{-13}$ ) виберемо в'язкість ґрунту  $\mu=10^{18}$  Па·с, щільність  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup>.

Горизонтально розташований нескінченний шар однорідного ґрунту під дією власної ваги може тільки рівномірно осідати, але при наявності значного загального нахилу вздовж вільної поверхні виникає течія. При цьому відбувається нерівномірне осідання елементів схилу. Подальше накопичення деформацій призводить до руйнування внаслідок зрізу, утворення тріщин зрізу, розриву чи зсуву у напрямку падіння, чи випору у напрямку базису схилу (ерозії). Про це наочно свідчать отримані результати руху ґрунту поблизу схилу (рис. 1). В основі та на гребені схилу швидкості руху значно повільніші. Проведено чисельний експеримент для визначення впливу кута  $\alpha$  нахилу укосу з  $\alpha=10^\circ$  до  $\alpha=22^\circ$ .

Аналізуючи напружений стан при різних кутах схилу, можна побачити, що характер руху та напруженого стану у розглянутому діапазоні схилу мало змінюється в якісному розумінні. З цього можна зробити висновок про можливість зсувів навіть при незначних нахилах вільної поверхні. Кількісно напруги та швидкості руху суттєво збільшуються, що свідчить про підвищення ймовірності зсувів для крутіших схилів (з порівняння рис. 1–3).

На рис. 4 наведено зображення характеру деформацій в області. Помітно, що істотні деформації ґрунту відбувається у зоні, що прилягає до вільної поверхні схилу. Більш якісну візуалізацію можна отримати за допомогою засобів геоінформаційних систем [12].

Напружений стан області, що утворюється внаслідок плину в'язкого ґрунту, наведено на рис. 5, де зображені

ізолінії максимальних дотичних напруг, які входять до критерію руйнування. Видно, що поблизу поверхні в результаті деформацій утворюються значні зсувні напруги. Характер зміни нормальних напруг та тиску має гідростатичний розподіл, тому тут не наводиться.

З розглянутих вище прикладів можна зробити висновок про те, що наявність похилої ділянки вільної поверхні стає джерелом нестабільності цієї ділянки у вигляді підвищення швидкості руху цілої зони, що прилягає до схилу, виникнення горизонтальної компоненти руху (вектор течії повертається у бік схилу та нижньої долини) незалежно від кута схилу, змінюється лише швидкість руху в прямій залежності від крутизни схилу. В той же час за відсутності схилу при додатковому навантаженні відбувається лише рівномірне вертикальне осідання ґрунту, що спостерігається у випадку будівництва споруд. В основі укосу утворюються зони концентрації розтягуючих напруг та поверхні ковзання, які можуть служити спусковим механізмом обвалення укосу. Напружений стан поширюється на всю товщину зсувного шару.

За властивостями в'язкого тіла воно не руйнується, а розтікається, вирівнюючи вільну поверхню до горизонтального стану. В той же час реальні ґрунтові матеріали мають граничні напруги чи граничні деформації, після досягнення чи перевищення яких стається руйнування (розрив суцільності, зміна консистенції) матеріалу схилу.

Для аналізу напруженого стану ґрунтової області використовуються критерії руйнування ґрунтових структур, найчастіше – критерії Мізеса–Сен-Венана, Мізеса–Шлейхера–Боткіна, Кулона–Мора та інші. Слід зазначити, що запропоновані критерії руйнування ґрунтового сере-



довища дають можливість визначити зони і розміри тіла можливого зсуву і перейти до врахування впливу інших факторів, як спускових механізмів зсувів, а саме – утворення зон пришвидшення руху внаслідок зменшення коефіцієнту в'язкості. Такі ефекти відбуваються внаслідок раптового істотного зволоження області схилу, зміни консистенції ґрунтів на підшві, сейсмічного навантаження, таке інше.

Викладені вище методи розв'язку задач можуть бути використані для вирішення зворотної проблеми – визначення коефіцієнту в'язкості ґрунтової структури шляхом підбору за відомими швидкостями течії окремих ділянок схилу чи поверхневого шару як цілого тіла. Оцінку актуальності запропонованих моделей чи їх калібровку можна виконати також шляхом реалізації чисельного аналога лабораторних приладів (віскозиметра, крутильного навантаження зразків). Прості розв'язки використовуються для отримання розрахункових параметрів

щільності, в'язкості та вологості за експериментальними даними та натурними спостереженнями за ґрунтовими структурами [1, 3]. На додаток до нормативних оцінок стійкості схилів [7] можна отримати характер напружено-деформованого стану та швидкості руху елементів схилу.

#### ВИСНОВКИ:

Представлена методика розрахунку напруженого стану і деформування ґрунтового схилу на базі лінійної моделі в'язкої слабо стисливої рідини Ньютона. Задача розв'язується методом скінченних різниць. З метою аналізу зсувного процесу в схилах та укосах з м'яких ґрунтових матеріалів розглянута задача про рух шару однорідного ґрунту постійної товщини під дією власної ваги і досліджений вплив кута нахилу схилу відносно горизонтальної вісі на напружений стан та розподіл швидкостей деформацій.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве / Н. Н. Маслов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 468 с.
2. Зарецкий Ю. К. Идеи Н. Н. Маслова в современной геомеханике / Ю. К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 6. – С. 5–21.
3. Билеуш А. И. Оползни и противооползневые мероприятия / А. И. Билеуш. – К.: Наук. думка, 2009. – 560 с.
4. Негматуллаев С.Х. Сарезское озеро: проект по снижению риска / С. Х. Негматуллаев // Світ геотехніки. – 2006. – 2. – С. 31–33.
5. Müller L. The rock slide in the Vaiont valley / L. Müller // Felsmechanik und Ingenieur-geologie. – 1964. – 2. – P. 148–212.
6. Ишихара К. Оползень просадочных лессовых отложений в республике Таджикистан, вызванный их разжижением / К. Ишихара // Світ геотехніки. – 2006. – 2. – С. 14–20.
7. ДБН В.1.1 – 24: 2009 Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. – 108 с.
8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Мир, 1969. – 863 с.
10. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. – М.: Высш. школа, 1985. – 352 с.
11. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. – Т. 2. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
12. Островерх Б. М. Аналіз стану ґрунтових схилів та укосів за картографічними та геоінформаційними матеріалами / Б. М. Островерх, О. А. Колодяжний, Л. С. Потапенко // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць. Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування. – К.: НДІБК. – в друку.



РИСУНКИ ДО СТАТТІ ОСТРОВЕРХ Б. М., САВИЦЬКИЙ О. А., РЕВА Т. Л., ЛИТВИНЕНКО О. Р., СІДЬКО М. І.  
 «РУХ ТА НАПРУЖЕНИЙ СТАН СХИЛІВ ТА УКОСІВ»

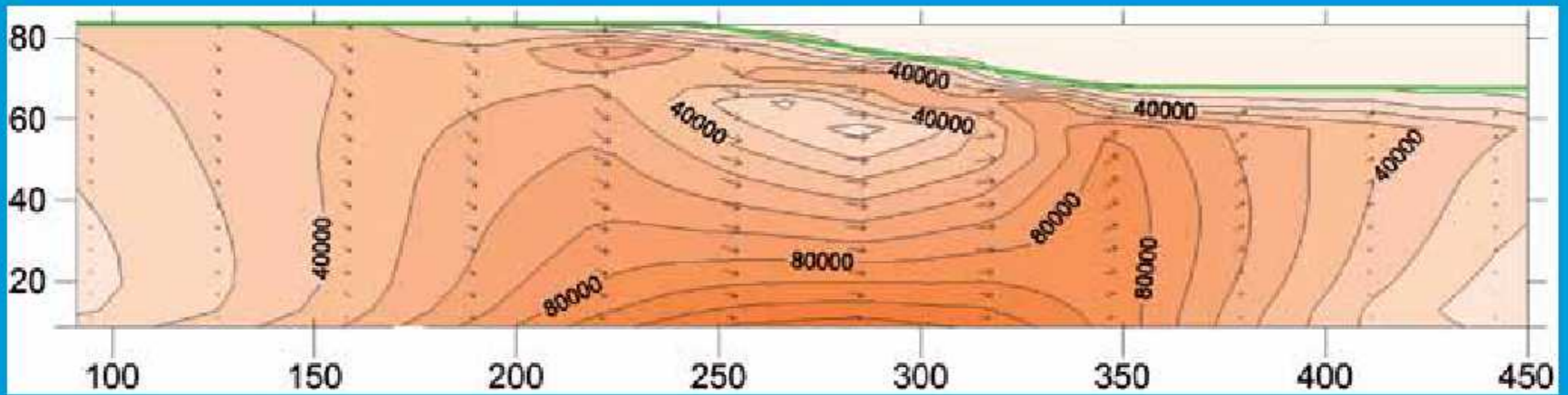


Рис. 1. Вигляд руху (поле швидкостей – стрілки) та напруженого стану ( $\tau_{xy}$ , Па) ґрунту на схилі з кутом  $\alpha = 10^\circ$  під дією власної ваги. Максимальна швидкість в'язкої течії  $V=16$  см/рік

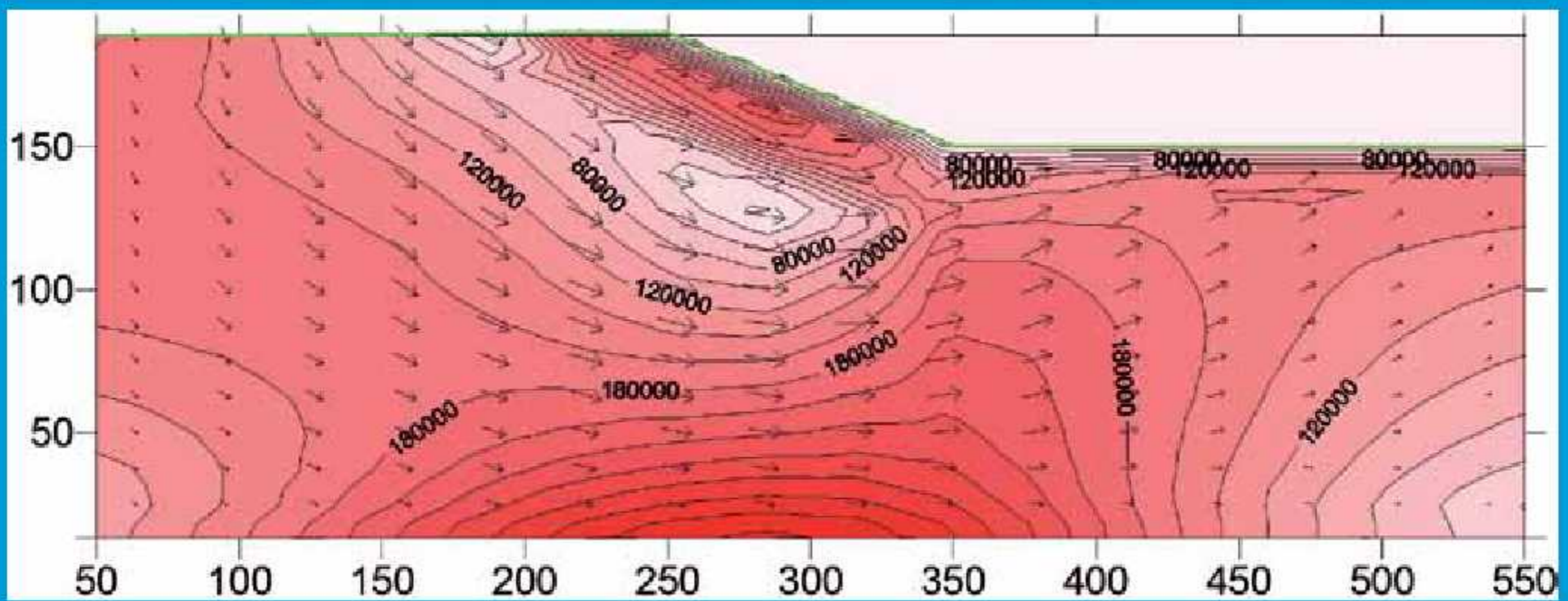


Рис. 3. Поле швидкостей (стрілки) та напружений стан ( $\tau_{xy}$ , Па) ґрунтового схилу з кутом  $\alpha = 22^\circ$ . Максимальна швидкість  $V=61$  см/рік

РИСУНКИ ДО СТАТТІ ШКОДА В.В., СЬОМЧИНА М.В., ШКОДА А.В. «ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬ ПРИ  
 ЇХ РЕКОНСТРУКЦІЇ ШЛЯХОМ НАДБУДОВИ ДОДАТКОВИХ ПОВЕРХІВ»

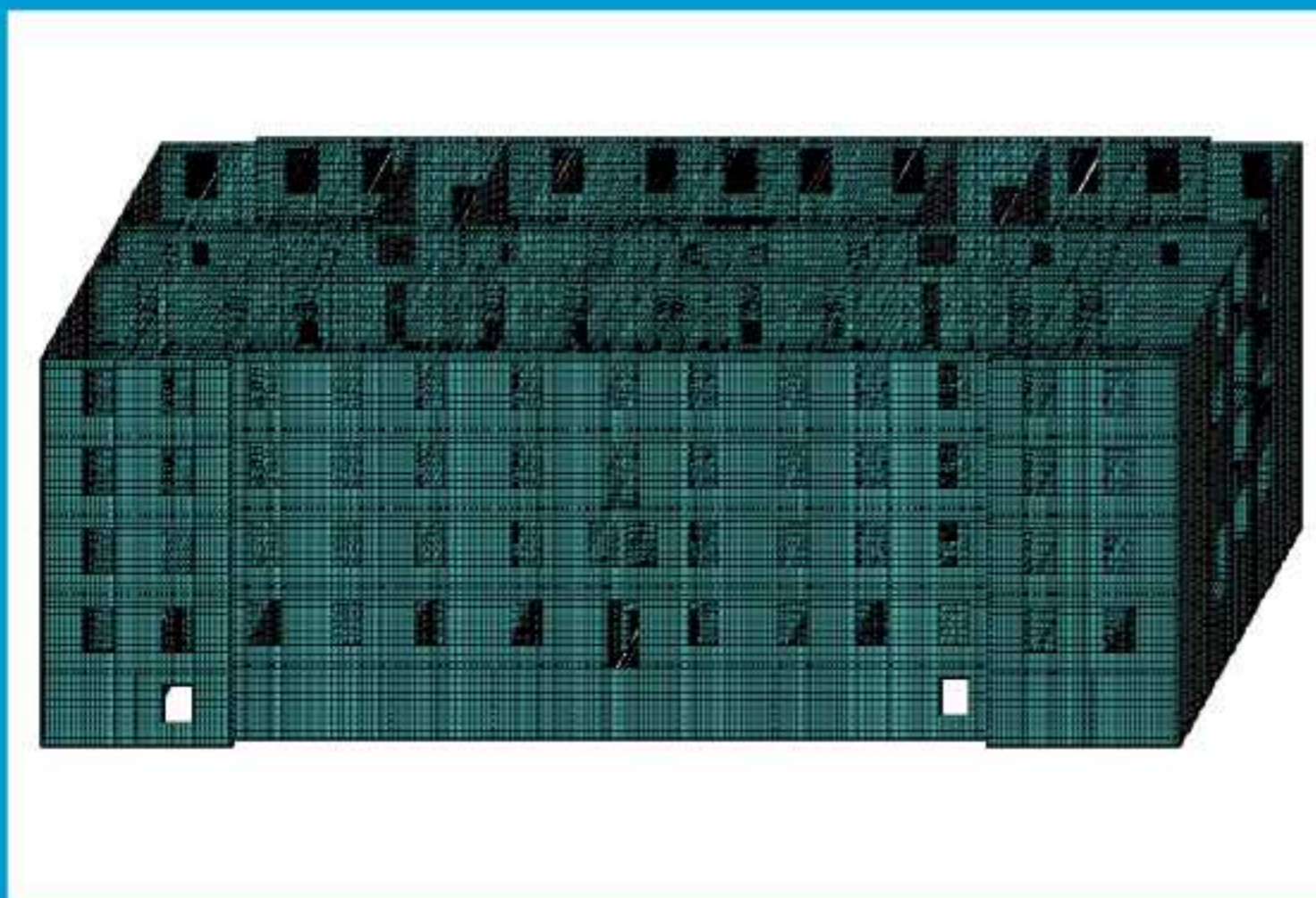


Рис. 2. Розрахункова схема моделі будівлі з врахуванням надбудови додаткового поверху

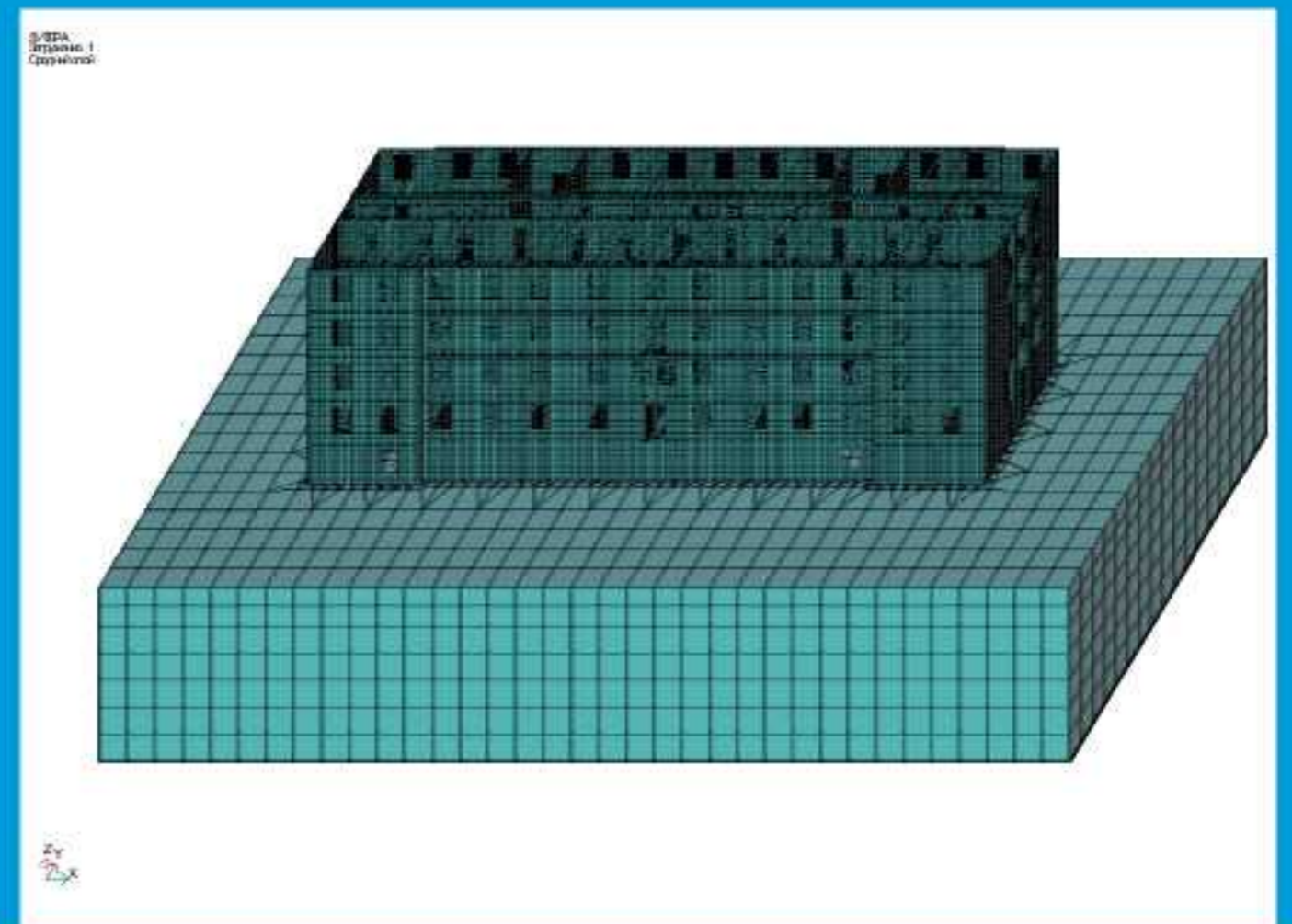


Рис. 3. Розрахункова модель системи «будівля-основа»