



С. В. ЗАЙЧЕНКО,
доктор техн. наук
(Національний технічний
університет України «КПІ»)



О. О. ВОВК,
доктор техн. наук
(Національний технічний
університет України «КПІ»)

Постановка проблеми. Моделювання процесу деформування ґрунту і будівельних сумішей з урахуванням їх в'язких властивостей потребує ретельного вивчення реологічних процесів, що супроводжують виникнення небезпечних динамічних проявів.

Динамічне навантаження відбувається в широкому діапазоні швидкостей передачі навантаження ґрунтовим масивом. З метою можливості отримання експериментальних даних варто встановити усереднену швидкість навантаження на основі попередніх досліджень шкідливих динамічних проявів. Тому для проведення дослідів з визначення реологічних властивостей прийнято швидкість навантаження в межах 5–10 м/с, за яких

УДК 624.16+69.035.4

Дослідження реологічних параметрів ґрунтових сумішей під час прогнозування небезпечних динамічних явищ

Описано метод визначення реологічних характеристик ґрунтових і бетонних сумішей під час моделювання процесу виникнення небезпечних динамічних явищ. Для моделювання властивостей оброблюваного середовища використано в'язкопластичну модель Бінгама. Розглянуто розподіл швидкостей дотичної деформації зразка за умов динамічного стиснення. Проведено експериментальні дослідження динамічного стиснення зразка з визначенням реологічних параметрів.

Ключові слова: ґрунтова суміш, динамічне стиснення, динамічна в'язкість суміші, пластична деформація.

Контактна інформація: o.a.vovk@mail.ru

швидкість дотичних (кутових) деформацій може перевищувати 25 с^{-1} , що за наявності в'язких властивостей оброблюваного середовища обов'язково виникають додаткові складові опору.

Виділення невирішеної проблеми. Одним з найдоступніших методів дослідження в'язких властивостей матеріалів є лабораторний експеримент. Під час дослідження закономірностей динамічного навантаження ґрунтів особливого значення набувають експериментальні умови, які мають відповідати умовам деформування середовищ. Отже, методика проведення дослідів має відтворювати динамічні характеристики процесу навантаження при виникненні шкідливих динамічних проявів.

Аналіз останніх досліджень. За відомими методиками експериментального дослідження деформування ґрунтів і ґрунтових сумішей під час динамічного одновісного навантаження можна моделювати цей процес з метою визначення їх в'язких властивостей. Щоб визначити динамічний коефіцієнт в'язкості (однаковий для будівельних сумішей і ґрунтів), застосовується метод занурення сферичного індентора з використанням залежностей Стокса для твердої кулі при її повільному рівномірному русі (занурення або спливання) у необмеженій в'язкій рідині [1, 2]. Ураховуючи, що опір середовища під час динамічного навантаження складається як мінімум з двох складових – в'язкої і пластичної, дослідники формулюють значення коефіцієнта як ефективну в'язкість.

Формулювання мети роботи. Для встановлення в'язких характеристик ґрунтових сумішей при прогнозуванні небезпечних динамічних явищ і встановленні закономірностей руху сейсмічних хвиль потрібно створити модель середовища, яка адекватно описує його поведінку при стисненні з експериментальним визначенням сталих.

Виклад основного матеріалу. Модель Бінгама експериментально вперше запропонована і підтверджена при моделюван-

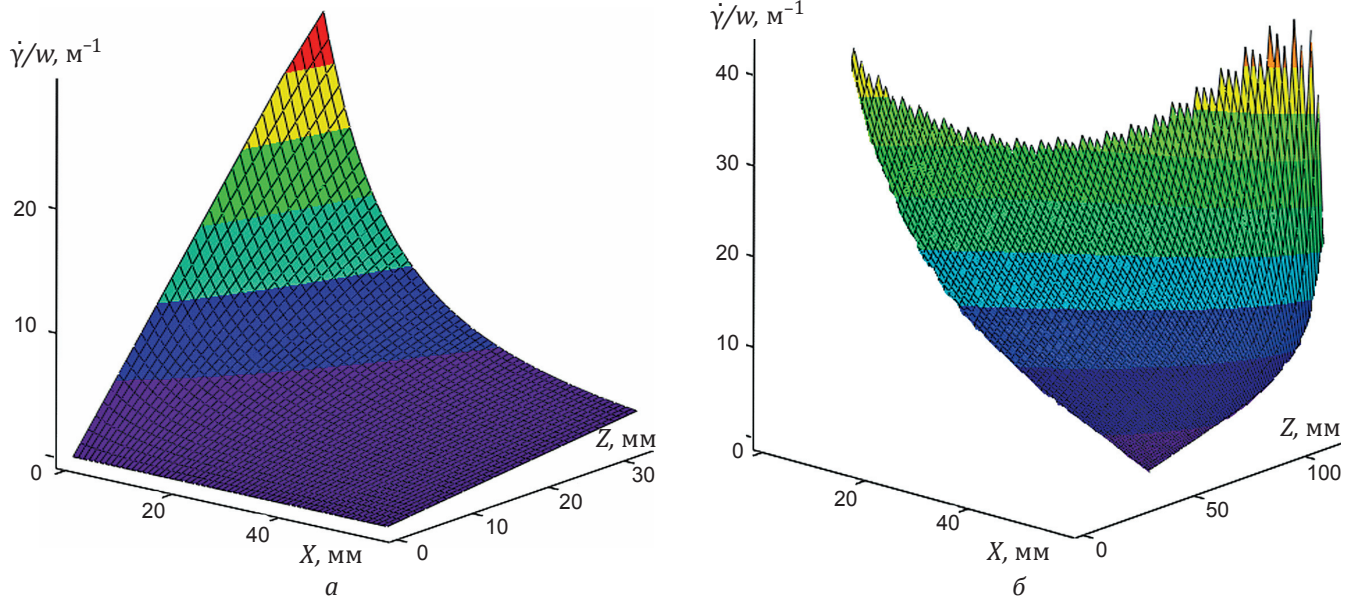


Рис. 1. Розподіл відносної швидкості кутових деформацій: *a* – зона до пуансона; *б* – зона дії пуансона; $h_0 = 0,12$ м, $R = 0,06$ м; w – швидкість навантаження.

ні деформування ґрунтів вченими П. А. Ребіндером, М. М. Масловим, М. Н. Гольдштейном, Е. В. Костеріним, В. Ф. Жуковим. Для умов динамічного деформування її можна подати виразом

$$\tau_s = \tau_{\pi} + \tau_{\nu}, \quad (1)$$

де τ_s – напруження зсуву;

τ_{π} і τ_{ν} – складові опору зсуву, зумовлені пластичними і в'язкими властивостями суміші.

Вважається, що під час застосування цієї моделі відбувається реакція оброблюваного середовища з урахуванням пластичних і в'язких ефектів. Інерційна складова не береться до уваги через відносно малі швидкості навантаження порівняно із швидкостями поширення хвиль деформацій. Так, для найлегших ґрунтових сумішей швидкість поширення хвиль деформації залежить від їх ущільнення і становить 270–670 м/с, що на два порядки більше за швидкість навантаження під час лабораторних досліджень. Переміщення поверхні ($< 0,02$ м) і пластичні деформації, які виникають при деформуванні середовища, розвиваються тривалий час (близько 0,1 с). Це прискорює частинки (< 25 м/с²), тобто впливає на характер розподілу напружень.

Отже, при лабораторних дослідженнях напруження, що виникають у середовищі, встановлюються за час, незрівнянно короткий, ніж час дії навантаження, що робить інерційну складову опору набагато меншою, ніж складові опору, викликані внутрішніми зв'язками середовища.

Опір τ_{π} зсуву сумішей залежить від ступеня їх ущільнення і дії на них нормального тиску, що дає змогу використати модель міцності Кулона–Мора

$$\tau_{\pi} = \sigma_1 \operatorname{tg} \varphi_T + \tau_0, \quad (2)$$

де σ_1 – нормальний тиск;

φ_T – кут внутрішнього тертя;

τ_0 – початковий граничний дотичний тиск (зчеплення).

В'язкі властивості середовища в моделі Бінгама подано тілом Ньютона, яке описується рівнянням

$$\tau_{\nu} = \mu \dot{\gamma}, \quad (3)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості суміші;

$\dot{\gamma}$ – швидкість дотичної деформації.

Модель в'язкопластичного середовища з урахуванням виразів (2) і (3) набуває вигляду

$$\tau_s = \sigma_x \operatorname{tg} \varphi_T + \tau_0 + \mu \dot{\gamma}. \quad (4)$$

Максимальні головні дотичні напруження σ_1 і σ_3 , що виникають у середовищах, визначаються виразом

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2. \quad (5)$$

Порівнюючи рівняння для максимальних дотичних напружень з умовами Кулона–Мора і припускаючи, що головні напруження зорієнтовані паралельно і перпендикулярно до площини навантаження, отримуємо матема-

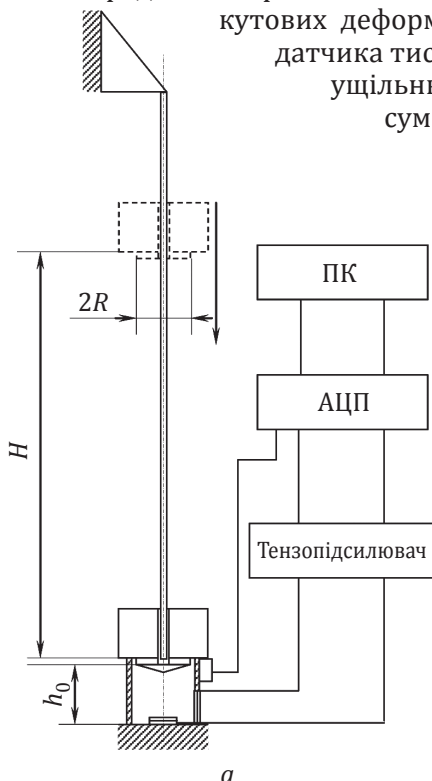
тичний вираз умови граничної рівноваги для ґрунтових і будівельних сумішей

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = \sigma_1 \operatorname{tg} \varphi_T + \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (6)$$

Розв'язавши рівняння відносно динамічної в'язкості суміші при відомих міцнісних (статичних) характеристиках, напруженнях і деформаціях, які виникають у середовищі під час динамічного навантаження, визначимо основні реологічні характеристики оброблюваних середовищ:

$$\mu = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 - (\sigma_1 \operatorname{tg} \varphi_T + \tau_0) / \dot{\gamma} \quad (7)$$

Зауважимо, що дотичні швидкості деформацій мають теоретичні нескінченні значення в кутах, утворених поверхнею пуансона і форми. У решті точок об'єму суміші всі компоненти кутових деформацій скінченні. У наведених дослідженнях використовувалися тензOMETричні мембранні датчики тиску, які дають змогу визначити усереднені значення тисків у площі контакту середовища і датчика. Тому для використання наведених залежностей визначення швидкості кутових деформацій треба визначити середнє інтегральне значення швидкості кутових деформацій по висоті датчика тиску на периферії ущільнюваного зразка суміші для обох зон (рис. 1, а, б).



На підставі рекомендацій, наведених у працях [3, 4], створено спеціальний лабораторний стенд динамічного навантаження ґрунтових сумішей (рис. 2). Він складається з механічного копра для регулювання висоти падіння бойка H , вимірювальної камери динамічного стиснення і комплексу вимірювально-реєструвальної апаратури: месдоза, тензопідсилювач, індукційного датчика переміщення, аналого-цифрового перетворювача (АЦП), персонального комп'ютера (ПК).

Типові криві динамічного навантаження ґрунтових і будівельних сумішей наведено на рис. 3, де крива переміщення має практично постійний нахил на більшій частині етапу навантаження, що вказує на сталість швидкості навантаження, тобто деформації. Це пояснюється порівняно малими витратами енергії на деформування зразка і великими – на деформування корпусу форми і пуансона при зіткненні буфера з формою. Доказом пружного деформування є відновлення елементів копра, яке відображається на рис. 3, в процесі зворотного руху пуансона.

Досліди проведено зі зразками діаметром 120 мм і висотою 120 мм. Деформація зразків становила 0,05, що відповідає 6 мм переміщення їх поверхні.

Результати дослідження динамічного навантаження свідчать, що із зростанням вертикальної складової нормального тиску σ_z зрос-

Рис. 2. Схема (а) і зовнішній вигляд (б) стенда тарування датчиків динамічного навантаження ґрунтових сумішей.

тає горизонтальна складова нормального тиску σ_x . До того ж унаслідок пластичних і в'язких властивостей суміші відбувається нерівномірний розподіл напружень в об'ємі зразка, що підтверджується різницею між нормальною вертикальною і горизонтальною складовими $\sigma_z > \sigma_x$. Різниця між тисками виникає не поступово, а миттєво в момент навантаження. Такий ефект пояснюється переважно пластичним характером деформування, горизонтальні напруження виникають тільки після подолання певної межі вертикальної складової тиску. Збільшенню напружень у зразку сприяє збільшення швидкості кінцевого руху пуансона. Підвищення швидкості навантаження спричиняє зростання відносної різниці вертикальних і горизонтальних напружень, що підтверджує в'язкі властивості зразків. Переважна частина дослідів при визначенні реологічних властивостей проводилася за максимально можливими швидкостями навантаження середовищ. Одночасно швидкість руху пуансона досягала 6 м/с.

Порівняння кривих навантаження зразків з різним вмістом компонентів суміші за однакових швидкостей навантаження і ущільненості свідчить про наближення середовища до рідини в разі збільшення вологості й вмісту глини в зразках. Наприклад, збільшення вологості в сумішах з меншим вмістом глини (10 %) підвищує пластичні і в'язкі властивості суміші. Насичення водою ґрунту з вмістом глини полегшує переукладання частинок унаслідок перерозподілу тисків між частинками із зменшенням сил тертя між ними.

Після закінчення процесу динамічного навантаження напруження не зникають, а залишаються внаслідок дії сил ваги пуансона і тертя між зразком і елементами форми. Остаточні напруження середовища, спричинені дією сил ваги пуансона і тертя, становлять менше 4 % максимального значення тиску, що дає змогу точніше визначити реологічні властивості ґрунтових і будівельних сумішей.

Значення вертикальних і горизонтальних нормальних напружень і швидкості деформування, що необхідні для визначення в'язкості середовищ за наведеними формулами, встановлювали з графіків динамічного навантаження при усталеній швидкості руху пуансона.

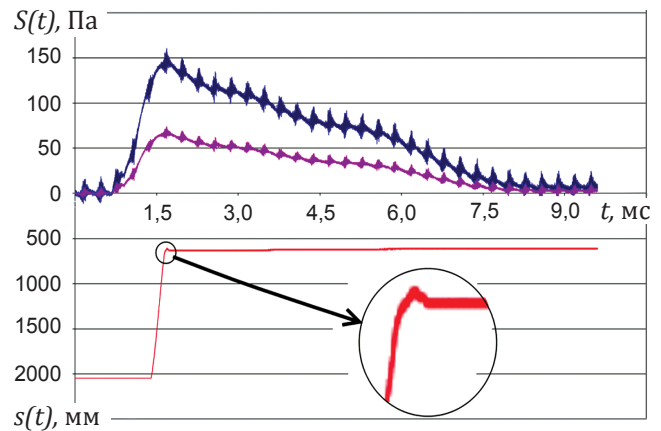


Рис. 3. Відображення перетворених АЦП даних тисків $S(t)$ і переміщення пуансона $s(t)$: — вертикальні нормальні тиски; — горизонтальні нормальні тиски; — крива переміщення.

Аналіз одержаних даних свідчить про істотну залежність динамічної в'язкості від ущільненості ґрунтової суміші. Підвищення в'язкості зі зростанням ущільненості ґрунтових сумішей пояснюється утворенням більшої кількості зв'язків, зокрема колоїдних. Збільшення вологості й вмісту глини у ґрунтовій суміші також збільшують в'язкість, хоча і меншою мірою.

Одержані результати корелюються з результатами дослідження в'язких властивостей цементних гелів і віброваних бетонних сумішей.

Описану методику можна використовувати для дослідження реологічних властивостей полідисперсних матеріалів тоді, коли інші методи визначення динамічної в'язкості не можна застосовувати.

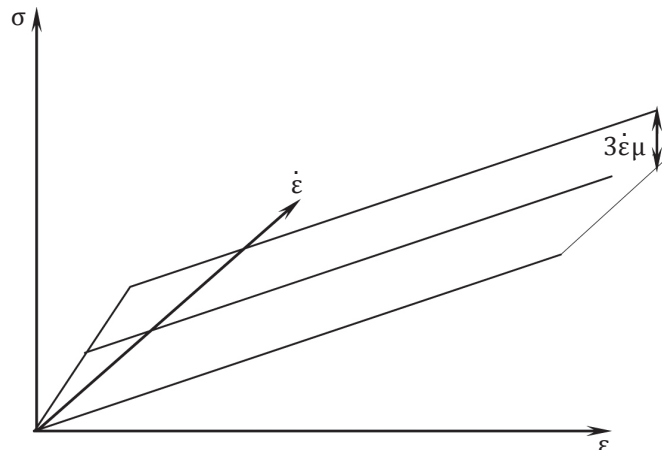


Рис. 4. В'язкопружна модель поведінки ґрунтів.

При встановленні реальних значень напружень з малими деформаціями, характерними для сейсмічних хвиль, ґрунти виявляють здебільшого в'язкопружні властивості, тоді можна використовувати модель Кельвіна-Фойгта:

$$K = H/N, \quad (8)$$

де H – тіло Гука;

N – тіло Ньютона.

Вираз (8) дає змогу встановити реальні значення нормальних напружень при динамічному навантаженні в зразку через лінійні деформації ε і швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$:

$$\sigma = \varepsilon E + \dot{\varepsilon} \mu_{\text{п}}, \quad (9)$$

де E – модуль деформації;

$\mu_{\text{п}}$ – позовжня в'язкість (в'язкість Трутона).

Графічно залежність (9) можна подати у вигляді ряду ліній (рис. 4).

Для тіла Ньютона позовжня в'язкість $\mu_{\text{п}}$ пов'язана з коефіцієнтом динамічної в'язкості μ залежністю (закон Трутона)

$$\mu_{\text{п}} = 3\mu.$$

Маючи значення лінійних деформацій ε і швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$, можна визначити динамічний модуль деформації E_d :

$$E_d = E + 3\mu(\dot{\varepsilon}/\varepsilon). \quad (10)$$

Висновки. Встановлення динамічних фізико-механічних властивостей гірських порід і ґрунтів під час прогнозування небезпечних динамічних явищ і закономірностей руху сейсмічних хвиль дасть змогу визначити з високою точністю реальні значення деформацій і напружень запропонованим методом моделювання властивостей оброблюваного середовища із застосуванням в'язкопластичної моделі Бінгама.

ЛІТЕРАТУРА

1. Караулова З. М. Порог ползучести и коэффициент вязкости глинистых грунтов / З. М. Караулова // Труды ВНИИГ. – Л.: Энергия, 1968. – Вып. 38. – С. 120–130.
2. Гусев Б. В. Вибрационная технология бетона: монография / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – К.: Будівельник, 1991. – 158 с.
3. Рахматулин Х. А. Вопросы динамики грунтов: [монография] / Х. А. Рахматулин, А. Я. Сагомоян, Н. А. Алексеев. – М.: МГУ, 1964. – 239 с.
4. Вовк А. А. Основы динамики грунтов и ее практические приложения / А. А. Вовк, Г. И. Черный, А. Г. Смирнов, В. Г. Кравец. – К.: Наук. думка, 1968. – 202 с.

ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1975

Журнал № 4 (рубрика «Краткие сообщения») информирует, что ГУУ Великобритании намечает к 1985 г. увеличить суммарную производственную мощность шахт на 42 млн т: на 9 млн т в результате продления срока службы и восстановления старых шахт, на 13 млн т благодаря расширению действующих и на 20 млн т в связи с вводом в эксплуатацию новых шахт.

В журнале № 4 (рубрика «Краткие сообщения») сообщается, что добыча угля в Польской Народной Республике возросла за 1945–1973 гг. с 27 до 156,6 млн т. Значительно повысилась эффективность угледобычи в результате концентрации горных работ и механизации производственных процессов. Среднесуточная нагрузка на шахту увеличилась с 2,9 тыс. т в 1948 г. до 7,9 тыс. т в 1974 г. Уровень механизации выемки в лавах возрос с 33,7 (1959 г.) до 90,2 (1973 г.), а нагрузка на лаву увеличилась на 400–500 т/сут, сменная производительность труда – на 3 т. Министерство энергетики и горного дела ПНР разработало основные направления развития отрасли до 1980 г., которые предусматривают увеличение добычи каменного угля до 200 млн т, а бурого угля – до 43 млн т в год. По данным журнала «Colliery Guardian» годовой объем мирового потребления энергии достиг 7500 млн т условного топлива. За последние пять лет потребление угля увеличилось с 2,3 до 2,8 млрд т условного топлива, нефти – с 2,5 до 2 млрд т, природного газа – с 1,2 до 1,5 млрд т условного топлива. Если такая тенденция роста сохранится, то к 1980 г. спрос на первичные источники энергии достигнет 12 млрд т условного топлива.