

693.542.523

І.І. Назаренко, д-р техн. наук, професор КНУБА,

М.О. Клименко, асистент КНУБА

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Фізико-механічні властивості оброблюваного середовища, що визначають його динамічне поведіння і структуроутворення, вивчені недостатньо і немає єдиної думки, які з властивостей необхідно регламентувати і враховувати при описі руху будівельних сумішей.

Вважається [1,2,5,7], що одними з найбільш часто використовуваних на практиці характеристик будівельних сумішей є однорідність, рухомість, жорсткість, кути природного укосу, тертя об поверхню, обвалення, ковзання, розмір і форма часток, межа текучості, початковий опір зсуву, модуль деформації, щільність тощо. Їх відносять до так званих первинних фізичних властивостей будівельних сумішей [5, 6].

Метою даної роботи є встановлення величини і характеру залежності коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя оброблюваного середовища від параметрів будівельних сумішей, їх реологічних властивостей та виду і способу навантаження.

Для визначення граничного напруження зсуву будівельної суміші по суміші був використаний віскозиметр Воларова, розроблений колективом московських авторів [3].

Пристрій представляє собою штатив, на якому закріплений диск, що має в середині обертовий пестик. Пестик зверху жорстко прикріплений до барабана, до якого на тросах, перекинутих через блоки, кріпляться тарілки для вантажів. Спочатку при обертанні рифленого пестика, зануреного в суміш, відбувається зріз суміші по суміші. Пестик, занурений в суміш на визначену глибину, починає обертатися в той момент, коли зовнішні сили, прикладені до нього, перевершать сили внутрішнього тертя між частками суміші, що утримують його в рівновазі.

Схема прикладених зусиль у плані у віскозиметрі Воларовича приведена на рис. 1. Рівняння рівноваги щодо осі обертання може бути представлено в наступному виді:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**  
де  $P$  – зовнішня сила;  $Q$  – сила опору суміші;  
 $D$  – діаметр барабана;  $d$  – середній діаметр пестика

Результати дослідів за цим методом вказують на значні похибки в результатах вимірювань та суттєвий розкид параметрів всередині однієї серії. Крім того, на сумішах з великим заповнювачем такі досліди не були проведені взагалі через неможливість занурити пестик в суміш.

В зв'язку із вищеозначеним, були розроблені інші пристрої і методи визначення кутів внутрішнього та зовнішнього тертя будівельних матеріалів і сумішей.

Зважаючи на те, що коефіцієнт внутрішнього тертя є комплексною величиною, який характеризує властивості часток, включаючи вплив зіткнень між окремими частками в процесі їхнього руху, введена градація коефіцієнта ( $i$ , відповідно, кута) внутрішнього тертя, на коефіцієнти тертя руху і спокою будівельних сумішей. Чисельно коефіцієнт

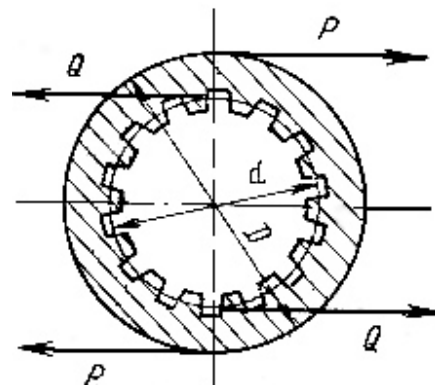


Рис. 1. Схема прикладання сил у віскозиметрі Воларова

тертя руху дорівнює тангенсові кута нахилу відкритої поверхні суміші до горизонту, при якому відбувається перехід часток суміші від стану руху до стану спокою, а коефіцієнт тертя спокою - тангенсові кута, при якому відбувається перехід від спокою до руху.

При визначенні кута внутрішнього тертя руху на першому етапі був використаний метод [4], який полягає у вирахуванні кута нахилу твірної конуса, отриманого при висипанні матеріалу з посудини з визначеної висоти (рис. 2), шляхом вимірювання ширини основи конуса  $b$  і його висоти  $h$ . Головним недоліком такого методу є залежність результатів вимірювань від висоти зсипання та діаметра  $d$  отвору бункера.

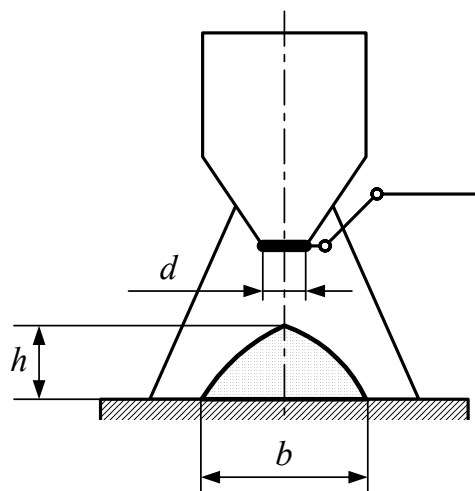


Рис. 2. Прилад для визначення динамічного кута природного укосу

Проте, на нашу думку, значно краще характеризує властивості руху статичний кут природного укосу (коефіцієнт тертя спокою), або кут обвалення. Сконструйований прилад для визначення цього кута зображений на рис. 3. Він складається з невеликого прямокутного ящика, в якому одна з торцевих стінок вставляється в зроблені в суміжних стінках пази. Прилад за допомогою гвинтів устанавлюється за рівнем горизонтально. Для визначення статичного кута природного укосу ящик заповнюється матеріалом до країв, і потім висувна стінка швидко віддаляється. При цьому із ящика висипається частина матеріалу, що знаходиться в ньому. Після цього вимірюється величина верхньої кромки, що звільнилася від матеріалу,  $b$ .

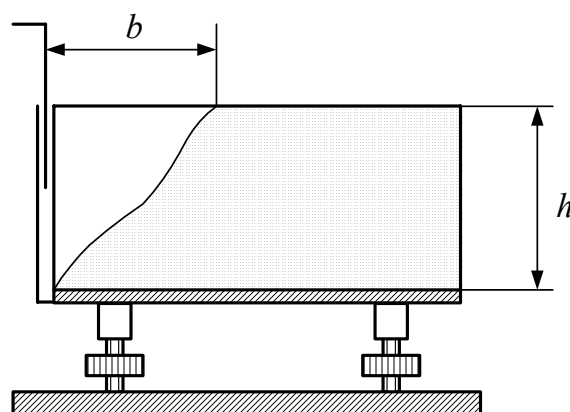


Рис. 3. Прилад для визначення статичного кута природного укосу

Відношення висоти шару  $h$  до величини  $b$  дорівнює тангенсові кута природного укосу.

В процесі дослідів було з'ясовано, що рухома стінка необхідно видаляти зі швидкістю не менше 0,3 м/с. При більш повільному видаленні стінки у вологих сумішей при їхньому обваленні залишається невелика вертикальна стінка, що робить невизначеним кут укосу.

При визначенні кута укосу дуже вологих сумішей вони після видалення стінки практично не висипаються із ящика, що вказує на повну відсутність сипучих властивостей в цих сумішах.

Для визначення кутів тертя руху і спокою *сипучих матеріалів та сухих сумішей* була використана конструкція, розроблена у Тамбовському інституті хімічного машинобудування [5]. Пристрій (рис. 4) складається з барабана 1 із прозорим торцем 7. На внутрішній поверхні обичайки барабана встановлена лопать 4, причому її вільний край співпадає з віссю обертання барабана, яке здійснюється приводом 8 (який може бути як ручним, так і від електродвигуна). Сипучий матеріал завантажується в барабан через люк 2 із кришкою. Співвісно з барабаном устанавлена кутова шкала 5, а на прозорій торцевій

стінці 7 встановлений рухомий прапорець 3. Барабан, привод і кутова шкала змонтовані на рамі 6.

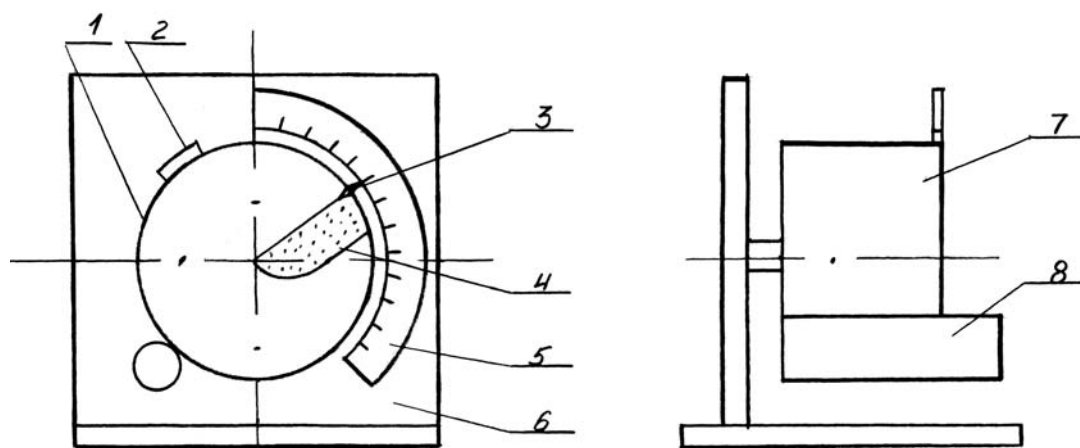


Рис. 4. Схема пристрою для визначення кутів тертя спокою і руху

Послідовність визначення кутів наступна. Навіску досліджуваного матеріалу засипають у барабан через люк 2. За допомогою привода барабан приводять в обертання. Матеріал при обертанні барабана попадає на увігнуту лопать, піднімається вгору і при визначеному положенні лопаті зсипається з неї. Після початку зсипання припиняють обертання барабана і, дочекавшись, коли зсипання закінчиться, сумістивши рухомий прапорець з відкритою поверхнею матеріалу, що знаходиться на лопаті, по шкалі 5 визначають кут нахилу цієї поверхні до горизонту. Як відзначалося вище, тангенс цього кута – є коефіцієнтом тертя руху. Барабан повторно приводять в обертання, яке припиняють, як тільки матеріал почне зсипатися з лопаті. По положенню прапорця визначають кут тертя спокою і потім коефіцієнт тертя спокою.

Дослідження, проведені з різними сипучими матеріалами, показали, що різниця між коефіцієнтами тертя руху і спокою може бути досить істотною, тому при розрахунку параметрів, що характеризують рух сипучих матеріалів, обидва коефіцієнти необхідно враховувати.

Якщо кути відрізнялися незначно, то барабан обертався з кутовою швидкістю  $\omega$ , рівною 0,001 – 0,05 від критичної, тобто в режимі, коли спостерігаються періодичні обвалення окремих порцій матеріалу.

Після визначення кута тертя руху  $\alpha_p$ , повторно включався барабан і вимірювався час  $\tau$ , за який відбулося десять обвалень матеріалу. Середній час між окремими обваленнями буде дорівнює  $\tau_{\text{сер}} = \frac{\tau}{10}$ , а значення кута тертя спокою,  $\alpha_{\text{сп}}$  визначається по формулі:  $\alpha_{\text{сп}} = \alpha_p + \omega \tau_{\text{сер}}$

Коефіцієнт зовнішнього тертя оброблюваного середовища визначався на приладі, зображеному на рис. 5.

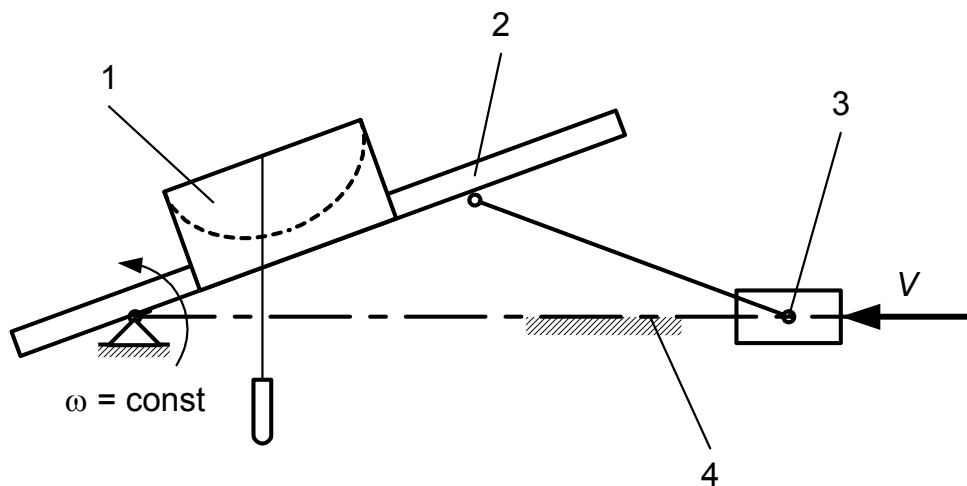


Рис. 5. Прилад для визначення коефіцієнта зовнішнього тертя

До міцної підставки 4 на шарнірах прикріплений невеликий лоток 2 з бортами. За допомогою гвинта 3 кут нахилу лотка може змінюватися від 0 до 90°. Величина кута в кожен момент часу визначається за допомогою виску і транспорту 1. Для того щоб при усіх положеннях мати підйом лотка з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  гвинт 3 може бути з'єднаний через редуктор з невеликим електродвигуном за допомогою якого і здійснюється зміна кута нахилу лотка. На дно лотка 2 укладаються пластини з різних матеріалів, що мають товщину, рівну висоті бортів лотка. Спочатку лоток установлюється строго горизонтально, на нього укладається пластина з випробуваного матеріалу, і зверху насипається шар будівельної суміші товщиною близько 40 мм. Після цього поступово збільшується кут нахилу. При певному куті шар суміші починає сповзати по пластині – цей кут і приймається за кут тертя.

Такі визначення були виконані для коефіцієнтів тертя суміші по сталі, полімерам, склу, дереву. На підставі цих визначень було встановлено, що при збільшенні вологості суміші від абсолютно сухого стану до 0,4 В/Ц, коефіцієнти тертя збільшуються. У цьому діапазоні зміни вологості коефіцієнти тертя залежать від шорсткості поверхні. При подальшій зміні вмісту води коефіцієнт тертя починає швидко зменшуватись і при цьому він стає майже однаковим для поверхонь з різною шорсткістю. Це відбувається тому, що при великій вологості суміші домінуючого значення набувають явища налипання часток суміші до досліджуваної поверхні.

На підставі проведених дослідів було встановлено, що при відносному русі шарів суміші величина сили тертя  $P$ , яка виникає при цьому, не пропорційна силі  $N$ , що притискає шари один до одного. Іншими словами, у цьому випадку не виконується закон тертя Кулона, відповідно до якого

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования..**

Залежність між  $P$  и  $N$  виходить у виді кривої (рис. 6). Спочатку до деякого навантаження  $N$  видимий коефіцієнт тертя  $f = \frac{P}{N}$  постійно зменшується до визначеної величини, після чого при подальшому збільшенні  $N$  він стає постійним, що характеризується прямолінійною залежністю між  $P$  и  $N$ . Якщо замінити сили  $P$  и  $N$  напруженнями, тобто віднести їх до одиниці поверхні шарів  $F$ , побудувати залежність дотичного напруження зрушення  $\sigma_{\text{дот}} = \frac{P}{F}$  від нормальної напруги  $\sigma_{\text{н}} = \frac{N}{F}$ , то буде отримана крива  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$ , аналогічна кривій  $P = f(N)$ . Дотична, проведена до кривої  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$  в точці  $\sigma'_{\text{н}} = \frac{N_1}{F}$ ,

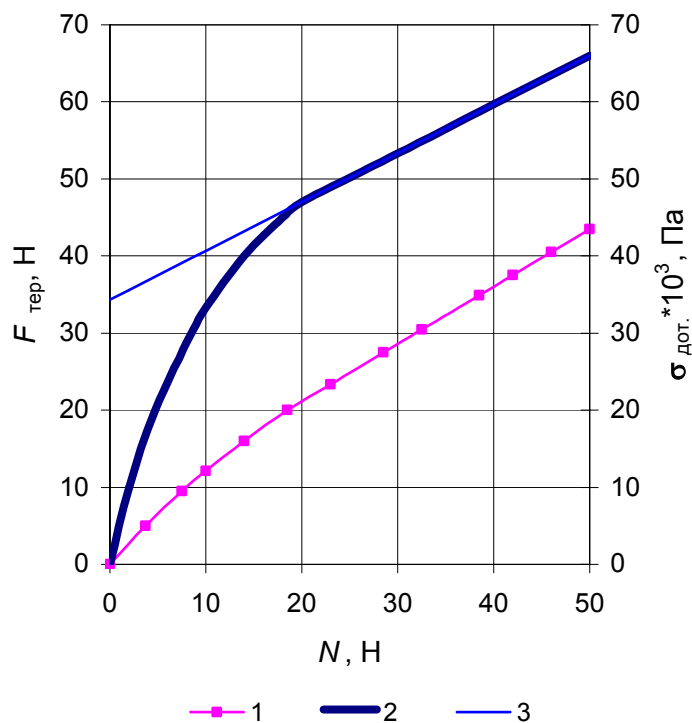


Рис. 6. Залежність сили тертя та дотичного напруження від прикладеного навантаження: 1 – залежність  $P = f(N)$ ; 2 – залежність  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$ ; 3 – дотична до кривої  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$  в точці  $\sigma'_{\text{н}}$

відтинає на осі ординат відрізок прямої, що є початковою напругою зрушення  $\sigma_0$  і характеризує сили злипання часток. Тангенс кута нахилу до осі абсцис прямої для значень  $\sigma_{\text{дот}}$ , більших  $\sigma'_{\text{дот}}$ , є дійсним коефіцієнтом тертя  $f'$ .

Для визначення залежності  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$  був сконструйований прилад, схема якого зображена на рис. 7.

Прилад складається з лотка 3, на який насипається шар випробовуваної суміші. На цей шар установлюється рухома рамка 4, в яку насипається та сама суміш. На шар суміші, що знаходиться в рамці, кладеться пластина, на яку установлюється вантаж 5. До рамки одним кінцем прикріплюється шнур 7, який перекидається через шків 8, і до його іншого кінця підвішується чашка, ваг 9.

Для того, щоб краї рамки 4 не вдавливалися в шар суміші, до її бортів збоку прикріплені чотири колеса, що спираються на розташовані під ними рейки.

З метою усунення впливу тертя, що виникає в самому приладі (головним чином при обертанні шківа) і виявлялося порівняним із силою тертя між частками суміші, вимірювання сили тертя виконувалося тензометричним методом. Для цього до рамки на спеціальних кулькових опорах 6 була прикріплена пружна пластина 10, на яку були наклеєні тензометричні датчики 11. Сила тертя вимірювалася за зміною опору тензометричних датчиків, що відбувалося в результаті деформації пружної пластини.

Регулювання горизонтального встановлення приладу здійснюється за допомогою гвинтів 1, установлених під основою 2.

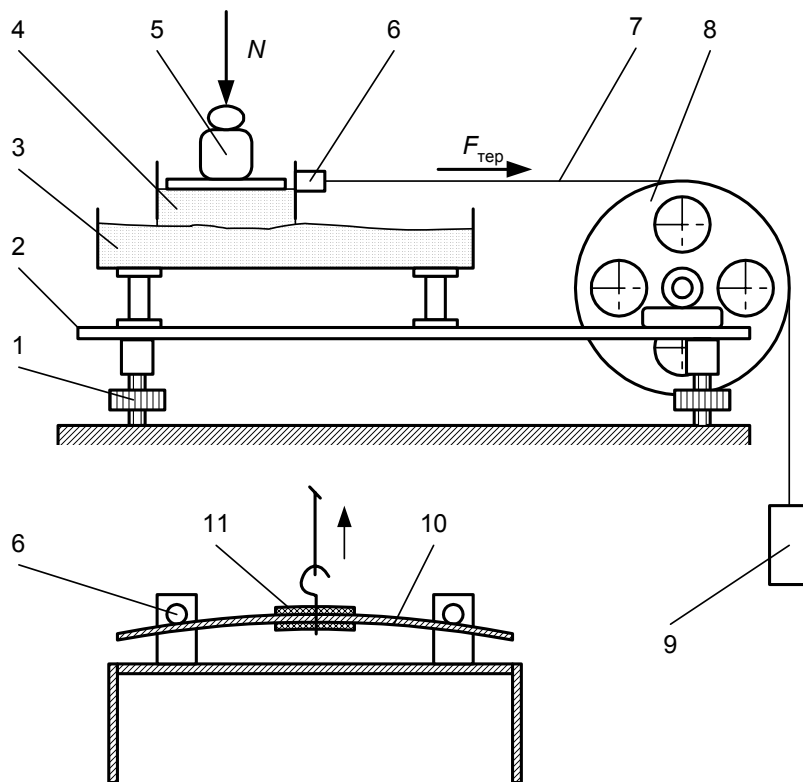


Рис. 7. Схема приладу для визначення залежності сили тертя при різних навантаженнях

Визначивши сили тертя при різній величині вантажу, що притискає шар матеріалу один до одного, була встановлена залежність  $\sigma_{\text{дот}} = f(\sigma_{\text{н}})$ , і на отриманій кривій була визначена початкова величина напруження зсуву  $\sigma_0$  і дійсний коефіцієнт тертя  $f'$ .

Для виявлення характеру зміни реологічних властивостей різних по своїх фізико-механічних характеристиках і призначенню сумішей були використані цементно-піщана суміш і суміші, в яких в якості великого заповнювач застосовувалися вапняк, граніт і керамзит.

Спочатку досліди проводилися на сумішах, що мають найменше водоцементне відношення, обумовлене природною вологістю заповнювачів, після чого в суміш поступово визначеними дозами (0,03...0,1 В/Ц) додавали воду. Після кожної добавки води реєстрували вимірювані параметри. Об'єм суміші був однаковим у всіх дослідах.

Оскільки було встановлено, що при відносному русі шарів суміші величина сили тертя не пропорційна силі, що притискає шари один до одного, було вирішено провести додаткові дослідження коефіцієнта зовнішнього тертя.

Для визначення граничного напруження зсуву суміші по металу був виготовлений прилад, представлений на рис. 8, що конструктивно є уніфікованим із пристроєм на рис. 7. Прилад складається з підставки 1 зі шліфованою робочою поверхнею. На підставці жорстко закріплена стійка 6, у верхній частині якої змонтована система блоків 7. Через блоки перекинута трос 4, до одного кінця якого прикріплена чаша для вантажів 5, а інший прикріплений до квадратної рамки 2 зі стороною 300 мм, у яку завантажують випробувану суміш 3.

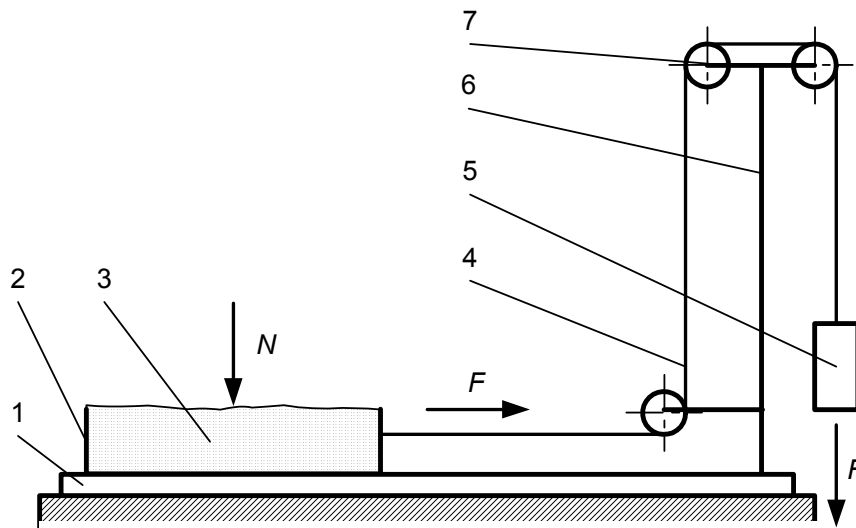


Рис. 8. Схема приладу для визначення залежності коефіцієнта зовнішнього тертя

На попередньо змочену робочу поверхню підставки встановлюють рамку, на яку рівним шаром по верхній обріз рамки укладають випробувану суміш. По вантажі, при якому рамка із сумішшю починає рухатися в горизонтальній площині, визначають граничне напруження зсуву  $\sigma = \frac{P}{F}$ .

Коефіцієнт тертя сталі по суміші дорівнює:

**Ошибка! Объект не может быть создан из кодов полей редактирования.**

В усіх випадках втратами на тертя в підшипниках блоків троса нехтували, тому що підшипники були попередньо добре змащені.

Експерименти були проведені на бетонних сумішах з витратою цементу 200, 400 і 600 кг/м<sup>3</sup> і розчину з витратою цементу 180, 360 і 720 кг/м<sup>3</sup>. Спочатку досліди проводили із сумішшю, що має мінімальний водовміст, обумовлений природною вологістю заповнювачів, потім у суміш додавали воду з інтервалом у залежності від складу 0,03 - 0,1 В/Ц, після чого суміш ретельно вручну змішували і дослід повторювали. Весь цикл займав: 10 - 15 хв., що не могло спотворити отримані результати, тому що вплив процесу гідратації ще був незначним.

По отриманим даним були побудовані криві залежності граничної напруги зсуву суміші по сталі від В/Ц фактора (рис. 9). Криві мають складну форму. Спочатку зі збільшенням водовмісту граничне напруження зрушення росте, а потім, пройшовши максимум, воно зменшується.



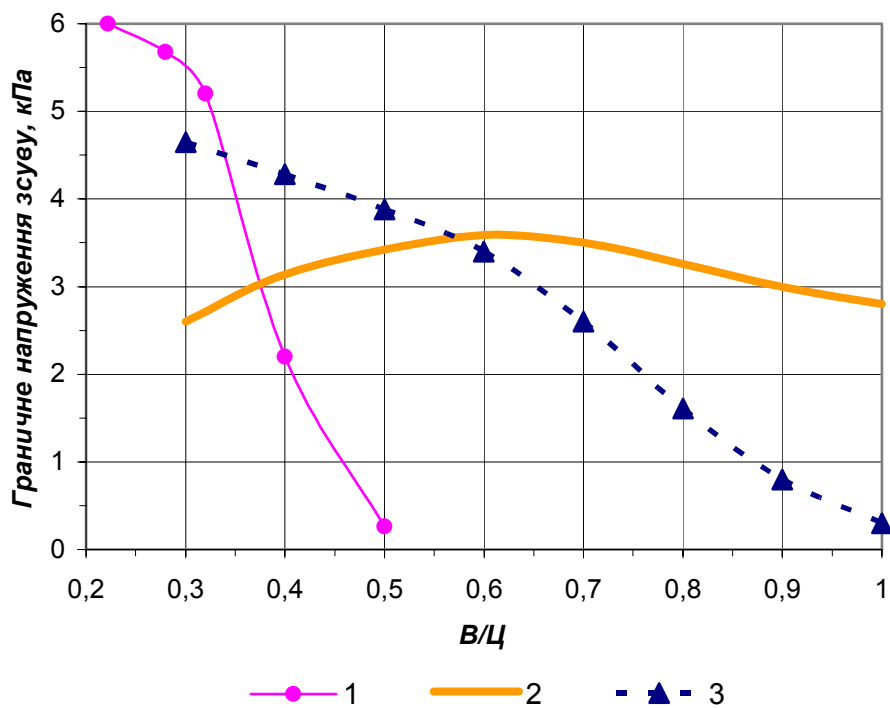


Рис. 9. Залежність граничного напруження зсуву розчину по сталі від водоцементного фактора при витраті цементу:  
 1 – 180 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 360 кг/м<sup>3</sup>; 3 – 720 кг/м<sup>3</sup>

Результати дослідів по визначенню граничного напруження зрушення суміші по суміші представлені на рис 10.

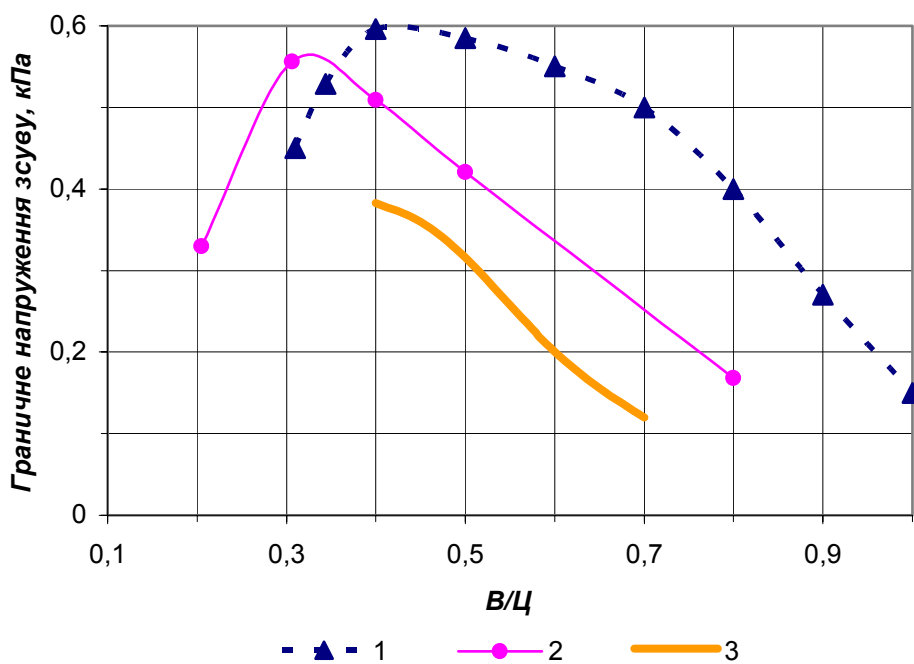


Рис. 10. Залежність граничного напруження зсуву суміші по суміші від водоцементного фактора при витраті цементу:  
 1 – 180 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 360 кг/м<sup>3</sup>; 3 – 720 кг/м<sup>3</sup>





Аналізуючи отримані результати, можна прийти до наступного висновку. Граничні напруження зрушення не постійні і залежать від складу суміші. Граничні напруження зрушення суміші по сталі спочатку при низьких В/Ц ростуть, досягають якогось максимуму, а надалі, у міру збільшення водовмісту суміші, знижуються. Це добре видно на жирним сумішах з великим вмістом цементу. У худих сумішей з низьким вмістом цементу граничні напруження зрушення мають аналогічний характер, але в зв'язку з низькою чутливістю приладу цей процес на графіку, виражений практично незмінним. Характер зміни граничного напруження зрушення суміші по суміші аналогічний описаному.

#### *Література*

1. Десов А.Е., Ким К.Н. Автоматическое регулирование жесткости и подвижности бетонной смеси. – М.: Стройиздат, 1969. – 119с.
2. Бунин М.В. О критерия качества смеси// Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. – 1958.
3. Королев К.М. Интенсификация приготовления бетонной смеси. – М.: Стройиздат, 1976. – 145 с.
4. Королев К.М. Передвижные бетонорастворосмесительные и бетононасосные установки. – М.: Высшая школа, 1991. – 208с.
5. Першин В.Ф. Исследование, разработка и методика расчета режимных и геометрических параметров машин барабанного типа. – Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1979.
6. Дьяконов Г.К. Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов. – М.,Л.: Изд. АН СССР, 1956. – 206с.
7. Керов И.П. Применение теории подобия к расчету сопротивлений при движении в сыпучих телах и вязких средах// Тр. Горногеологического института. Западносибирский филиал АН СССР. – в.19. – 1957. – С. 299-317
8. Веников В.А. Теория подобия – моделирование. – М.: Высшая школа, 1984. – 439с.