

than nominal load, which characterized by uniform loading of drives. The coefficient of dynamics, which shows at how many times maximal load in transmission line is bigger than nominal, is introduced for appreciating of the influence of dynamical component of load to the load of drive. Since the frequency of cinematic disturbance is determined by frequency of tumbling mill rotation, the mechanical transmission rigidity is the single factor, which has an influence on the value of dynamic component of twist moment.

**Findings.** The analysis of data indicates that when the frequency of disturbance is small and cinematic disturbance has the same frequency as the frequency of ring gear, the resonance is able to occur when the rigidity of mechanical transmission is small and dynamic component of twist moment is able to be insignificantly low in comparison with the nominal value. When transmission rigidity is rising, the dynamic component of twist moment is rising too.

When the frequency of disturbance is according to frequency of gear wheel and the rigidity of transmission

is relatively big, the resonance is able to occur and twist strain is able to result in annoying load.

It is shown that the limitation of dynamic load and uniform distribution of static load at drive induced by static and cinematic displacement angles of rotors can be provided by transmission drive twist rigidity reduction.

**Originality.** The influence of mechanical transmission on static and dynamic load in two-motor drive of tumbling mill is discovered.

**Practical value.** The feasibility of limitation of dynamic load and irregularity of static load distribution in the two-motor synchronous drives of tumbling mills due to the mechanical transmission rigidity lowering is established.

**Keywords:** *synchronous motor, oscillator, mathematical model, torsion rigidity*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.П. Надутим. Дата знаходження рукопису 26.10.11*

УДК 624.131

**И.А. Садовенко, д-р техн. наук, проф.,  
Н.И. Деревягина**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,  
e-mail: natali.derev@gmail.com

## О ПОТЕНЦИАЛЕ АКТИВАЦИИ ОПОЛЗНЕВОГО ЛЕССОВОГО МАССИВА

**I.A. Sadovenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
N.I. Derevyagina**

State Higher Educational Institution “National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: natali.derev@gmail.com

### ABOUT ACTIVATION POTENTIAL OF LOESS LANDSLIDE MASSIF

**Цель.** Рассмотрение количественной интерпретации положения границы, где энергия связей лессового грунта недостаточна для устойчивости склона и оценивается на основе совмещения энергетического и механического подходов.

**Методика.** Методика исследований включала проведение серии стабилметрических испытаний лессовых пород при различных условиях нагружения. На основе испытаний получены зависимости прочностных и деформационных характеристик лессов в зависимости от их физического состояния и природных условий, в которых они находятся. Установлено, что режим нагружения влияет на изменение модуля деформации лесса в пределах одного порядка.

**Результаты.** Разработанная расчетная схема учитывает сочетание естественно-геологических и геодинамических факторов в виде комплекса энергетической и механистической моделей. В результате моделирования получено поле физических градиентов, на основе которого обосновано новое понятие – потенциал активации склона. Установлено, что динамика деформационных процессов лессовых склонов формируется под воздействием естественно-геологического генезиса отложений и изменяющихся геодинамических факторов. Предложенная методика моделирования устойчивости лессовых грунтов учитывает это сочетание в конечно-элементном представлении грунтового массива уравнениями неразрывности деформаций и поля гравитации, где введена генетическая и техногенная составляющие.

**Научная новизна.** Сформулировано понятие потенциала активации оползневого лессового массива, необходимое для адекватного отражения процессов, происходящих в лессовых породах.

**Практическая значимость.** Предложенное понятие потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны создают предпосылки для прогнозного разделения различных фаз оползневых процессов. Разработки апробированы на конкретном инженерно-геологическом объекте – склон балки Тоннельной в г. Днепропетровске.

**Ключевые слова:** *лессовые породы, энергия склона, трехосные испытания грунтов, потенциал активации склона, численное моделирование*

**Постановочные аспекты.** Большинство осложненных, возникающих при инженерном освоении грунто-

вых массивов среднего Приднепровья, связано со специфическими свойствами лессовых пород. Основными из них являются – просадочность при достижении критической влажности, фильтрационная анизотропия,

анизотропия прочности и деформируемости, переход в текучее состояние при полном водонасыщении. Эти особенности существенно усложняют прогноз поведения грунтовых склонов и принятие инженерных решений при строительстве. Как следствие, возникают аварийные ситуации с недопустимыми деформациями инженерных сооружений и возникновением оползней.

Известны два подхода к оценке устойчивости лессовых склонов – механистический (согласно Емельяновой Е.П.) и энергетический (согласно Кригеру Н.И.). Первый базируется на учете сил гравитации и реакции грунтов, причем различия в методиках расчетов устойчивости касаются геометризаций предполагаемых поверхностей скольжения. Прогнозируемое состояние неустойчивое состояние должно совпадать с фазой „мгновенного“ оползня. В реальных инженерно-геологических условиях это состояние не отвечает расчетному.

Второй подход основан на учете состояния структурных связей в лессовых грунтах. Количественно это оценивается энергией этих связей и ее сопоставлением с работой, которая должна осуществиться при оползневом процессе. Последнюю величину можно зафиксировать по фактическому положению оползневого тела, однако вопрос прогнозируемого положения границы, где энергия связей недостаточна для устойчивости склона, остается открытым.

В статье рассмотрена количественная интерпретация положения указанной границы на основе совмещения энергетической и механической моделей устойчивости склона, сложенного лессовыми грунтами.

**Методика решения задачи.** Энергия, которая может реализоваться в виде работы в оползневом процессе, представляется в виде суммирования энергий:

– недоуплотнения лессов в период их геологического образования;

– положения лессовых слоев в поле гравитации;

– давления на каждый слой вышележащих грунтов.

Уплотнение дисперсных пород является сложным геологическим процессом, зависящим от гравитационного поля Земли и от состава и структуры самих пород. Физико-химические процессы при литогенезе вносят дополнительные осложнения в процесс уплотнения породы. Уплотнение рассматривается, преимущественно, как механическая работа, которая учитывает также диффузию, поверхностное натяжение, электрические, магнитные поля и т.д.

В результате влияния гравитационного поля на литогенез дисперсных отложений происходит их уплотнение (уменьшение пористости) в зависимости от их собственной массы и массы накапливающихся вышележащих отложений. Этот процесс сопровождается диссипацией механической потенциальной энергии.

Изменение суммарной потенциальной энергии частиц грунта при их перемещении на величину  $dl$  составляет (по Кригеру Н.И.)

$$\Delta U = gS \int_0^{h-H} m dl, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $m$  – масса единицы объема частиц;  $S$  – площадь горизонтального сечения грунтового массива, для которого рассматривается изменение энергии;  $H$  – мощность слоя;  $l$  – длина пути перемещения частиц, зависящая от глубины, структуры (пористости) породы и прочности структурных связей;  $h$  – высота столба породы, для которого производится подсчет энергии  $\Delta U$ .

Таким образом, согласно (1), если не происходит энергетическое возбуждение грунта под влиянием каких-либо сил, то геологическая эволюция грунта состоит в снижении энергетического уровня. Наиболее низкий энергетический уровень соответствует максимально плотной упаковке частиц и состоянию устойчивого равновесия. Другие энергетические уровни и меньшая плотность упаковки частиц отвечают состояниям неустойчивого или относительно устойчивого равновесия грунтового массива.

Эволюция плотности пород отражается законом сохранения энергии. Этот закон в виде первого начала термодинамики имеет вид

$$dQ = dU + PdV + d \cdot A', \quad (2)$$

где  $dQ$  – тепловой эффект;  $dU$  – изменение внутренней энергии;  $P$  – давление;  $dV$  – изменение объема;  $d \cdot A'$  – работа, совершаемая электрическими силами, молекулярным натяжением и диффузией. При рассмотрении уплотнения грунтов допустимо принять  $d \cdot A' = 0$ .

Уравнение (1) удобно использовать в виде

$$\Delta U = \int_0^H P(h) dl, \quad (3)$$

где  $P(h) = gS\gamma h$  – вес столба грунта с основанием  $S$  на глубине  $h$ ;  $\gamma$  – плотность грунта;  $S$  – площадь горизонтального сечения столба.

Для бесконечно малых величин перемещения частицы грунта и высоты столба породы  $dh$  можно принять, что  $dl = \delta dh$ , где  $\delta$  – коэффициент пропорциональности. Видно, что  $\delta$  представляет собой относительную просадочность лесса при природном давлении. Значение  $\delta$  может быть определено при испытании грунта в лаборатории или при замачивании котлованов. Таким образом

$$\Delta U = \int_0^H P(h) \delta dh = gS \int_0^H \gamma \delta h dh. \quad (4)$$

В простейшем случае для одного слоя, проинтегрировав (4)

$$\Delta U = \frac{gS\gamma\delta H^2}{2}. \quad (5)$$

Из уравнения (4) можно найти потенциальную энергию недоуплотненности для любого слоя лесса с глубинами его подошвы  $H_1$  и кровли  $H_2$

$$\Delta U = \frac{g\gamma\delta(H_1^2 - H_2^2)}{2}. \quad (6)$$

В частном случае, когда кровля слоя совпадает с поверхностью земли ( $H_2 = 0$ ), имеем выражение (5).

Кроме энергии недоуплотнения лессовых слоев склона, которая ограничена взаимным положением частиц грунта, потенциальный энергетический ресурс этих частиц обусловлен положением базиса возможного перемещения оползневого тела по вертикали вследствие сил тяжести. Для учета энергии положения следует в формуле (1) рассматривать ( $H$ ) как расстояние от слоя до плоскости эрозионного вреза склона в рельефе.

Третья составляющая потенциальной энергии лессового массива обусловлена силами реакции в слое лесса на воздействие сил тяжести  $n$ -го количества вышележащих слоев, т.е.

$$\Delta U_p = gSh \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{H_i}{2}. \quad (7)$$

Таким образом, реальный подход к оценке устойчивости лессового склона может состоять в численном сопоставлении конечно-элементных сечений, с рассчитанными составляющими энергий недоуплотнения, положения, давления и энергии связей. Учет последних, как было отмечено, проблематичен. В связи с этим, в качестве реальной предпосылки принято наличие плотной корреляции показателей энергии внутренних связей в лессе и показателей его физико-механических свойств – плотности, модуля общей деформации, удельного сцепления, угла внутреннего трения, коэффициента Пуассона и коэффициента консолидации. Это набор доступных стандартных определений, причем учет изменения этих показателей во времени требует повторения однотипной процедуры отбора образцов грунта из массива и их испытаний.

Адекватным методом отображения напряженно-деформированного состояния грунтового склона может быть построение численной конечно-элементной модели с указанными стандартными характеристиками грунта. Например, хорошие результаты дает использование алгоритма с учетом нелинейности и деформационного аналога предельной огибающей главных напряжений (согласно Фадееву А.Б.).

Наиболее важным является, кроме выбора алгоритма численной реализации уравнений равновесия и совместности деформаций, подход к заданию граничных условий и интерпретации результатов решений. Очевидным для конечного элемента модели будет выражение энергии его деформирования

$$\Delta U_i = E\Delta S_i b, \quad (8)$$

где  $E$  – модуль деформации грунта;  $\Delta S_i$  – изменение площади сечения конечного элемента;  $b$  – его единичная толщина.

Строго говоря, выражение (8) для произвольного конечного элемента должно обращаться в нуль, если модель адекватно отражает устойчивый грунтовый склон с известной геологической историей его образования. Однако, на практике задание условия весоного массива в поле гравитации всегда приводит к появлению деформаций. Обычно их интерпретация для выявления потенциальных поверхностей скольжения затруднена. Предполагая, что появление поля деформаций является отражением геологической истории формирования склона, наиболее удобно анализировать градиенты деформаций по координатным осям. В этом случае пересечения изолиний градиентов деформаций и изолиний суммарной потенциальной энергии в лессовом массиве должны отображать положение критических поверхностей внутри грунта.

**Экспериментальные исследования.** Отмеченная в постановочной части работы специфика свойств лессов требует максимального приближения гидрогеомеханических режимов испытаний образцов пород к реальным условиям. В частности, предпосылка о тесной корреляции изменения энергетических связей при увлажнении, неравнокомпонентном нагружении и фильтрационной консолидации в реальном массиве может быть реализована с учетом данных испытаний в стабилометре. Для этого использовался прибор фирмы VJTech (Великобритания). Конструкция стабилометра позволяет фиксировать модуль деформации, предельную огибающую главных напряжений при различной степени фильтрационной консолидации цилиндрического образца грунта, когда соотношение главных напряжений является следующим

$$\sigma_I > \sigma_{II} = \sigma_{III}.$$

Образцы для испытаний были отобраны в лессовых склонах балки Тоннельной (г. Днепропетровск), где наблюдаются оползневые процессы. Характерные графики изменения прочностных и деформационных показателей грунта представлены на рис. 1.

По результатам испытаний установлено, что для лессовидных суглинков четвертичного возраста при увеличении влажности от 10 до 15% значения удельного сцепления снижаются на 60%, а значения угла внутреннего трения, соответственно, на 20–25%. Режим нагружения существенно влияет на изменение модуля деформации лесса в пределах одного порядка.

**Результаты моделирования.** На рис. 2 представлено поле физических градиентов вертикального сечения лессового склона балки Тоннельная, где было произведено опробование грунтов и их испытания в стабилометре.

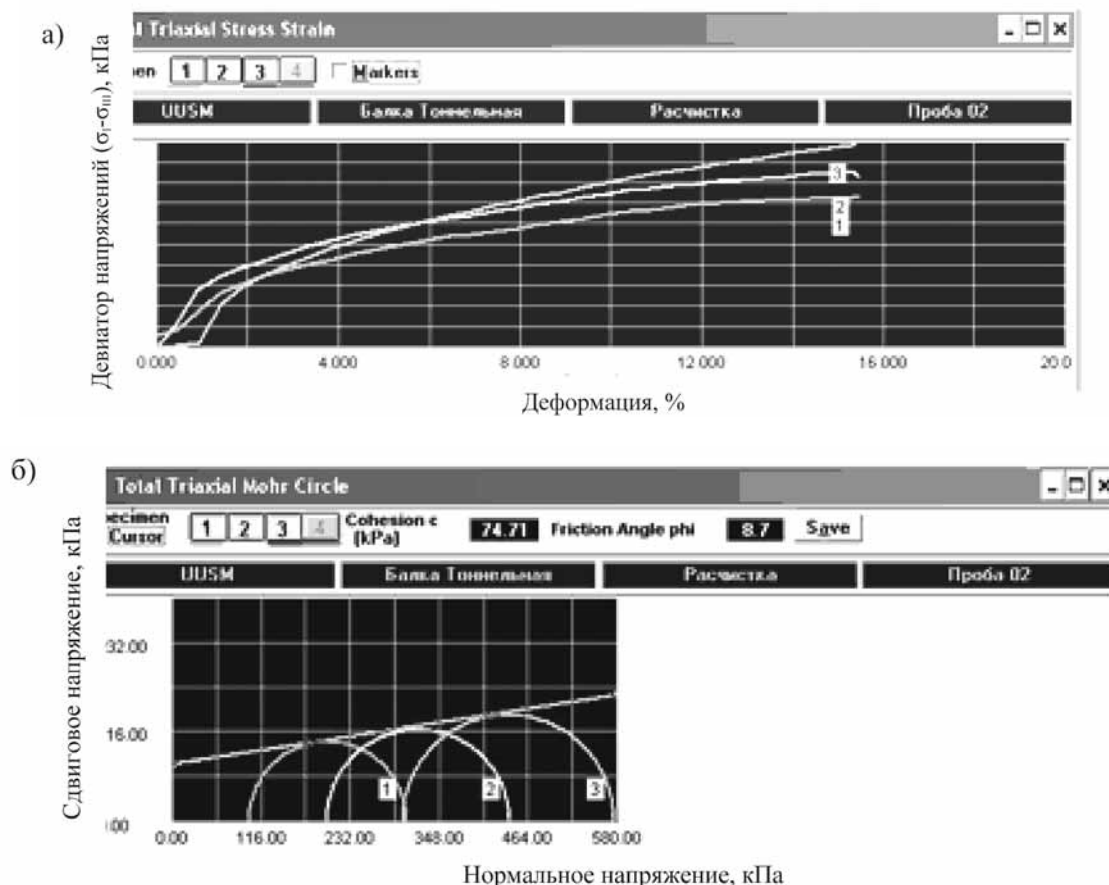


Рис. 1. Графики нагружения и деформирования образцов (1,2,3): а) зависимость осевых деформаций от девиатора напряжений; б) предельная огибающая кругов напряжений Мора

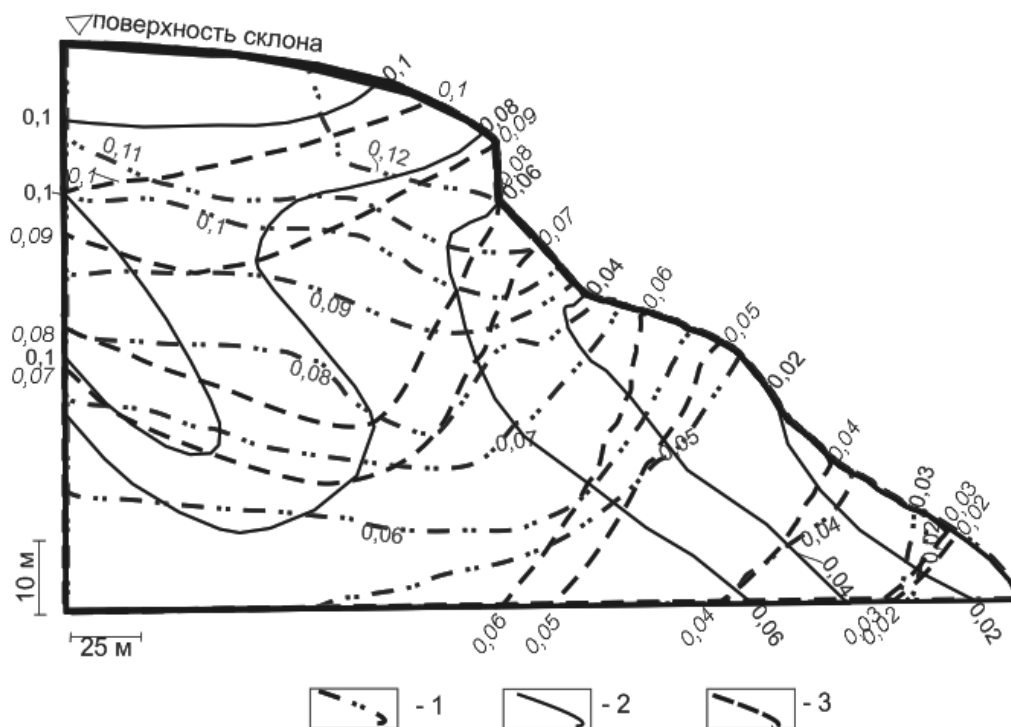


Рис. 2. Изолинии суммарных градиентов деформаций 1, энергии лессового склона 2, потенциалов активации склона 3, (д.ед.)

Отметим, что два первых показателя (рис. 2), полученные по результатам моделирования и отличающиеся от известных подходов формой их представления, позволяют предложить новое понятие – потенциал активации склона в виде суммы градиентов полной энергии и градиентов деформаций конечных (или бесконечно малых) элементов лессового массива.

Принятая в физике интерпретация поля потенциалов (в нашем случае потенциалов активации) позволяет по нормалям выделить прогнозные зоны существенно различных процессов течения, ступенчатого оседания и линий скольжения в теле оползня с их количественной характеристикой по величине потенциалов активации.

**Выводы.** Динамика деформационных процессов лессовых склонов формируется в результате сложного сочетания естественно-геологических и геодинамических факторов. Предложенная методика моделирования устойчивости лессовых грунтов учитывает это сочетание в виде комплекса энергетической и механической моделей, которые базируются на исходных параметрах стабилметрических испытаний образцов грунта. Введенное понятие потенциала активации лессового массива и его количественные диапазоны создают предпосылки для прогнозного разделения различных фаз оползневых процессов.

**Мета.** Розгляд кількісної інтерпретації положення границі, де енергія зв'язків лессового ґрунту недостатня для стійкості схилу і оцінюється на основі поєднання енергетичного і механічного підходів.

**Методика.** Методика досліджень включала проведення серії стабілометричних випробувань лессових порід при різних умовах навантаження. На основі випробувань отримано залежності міцнісних і деформаційних характеристик лесів у залежності від їх фізичного стану та природних умов, в яких вони знаходяться. Встановлено, що режим навантаження впливає на зміну модуля деформації лесу в межах одного порядку.

**Результати.** Розроблена розрахункова схема враховує поєднання природно-геологічних і геодинамічних факторів у вигляді комплексу енергетичної та механістичної моделей. У результаті моделювання отримано поле фізичних градієнтів, на основі якого запропоновано нове поняття – потенціал активції схилу. Встановлено, що динаміка деформаційних процесів лессових схилів формується під впливом природно-геологічного генезису відкладень і мінливих геодинамічних факторів. Запропонована методика моделювання стійкості лессових ґрунтів враховує це поєднання в кінцево-елементному поданні ґрунтового масиву рівняннями нерозривності деформації і поля гравітації, де введена генетична та техногенна складові.

**Наукова новизна.** Сформульовано поняття потенціалу активції зсувного лессового масиву, необхідне для адекватного відображення процесів, що відбуваються в лессових породах.

**Практична значущість.** Запропоноване поняття потенціалу активції лессового масиву і його кількісні діапазони створюють передумови для прогнозного розділення різних фаз зсувних процесів. Розробки апробовані на конкретному інженерно-геологічному об'єкті – схилі балки Тунельної в м. Дніпропетровську.

**Ключові слова:** лессові породи, енергія схилу, тривісні випробування ґрунтів, потенціал активції схилу, чисельне моделювання

**Purpose.** The article deals with quantitative interpretation of boundary where the bond energy of a loess soil is not sufficient to provide the slope stability. It is estimated by energetical and mechanical approaches.

**Methodology.** Research included a series of triaxial tests carried out for loess soils under different loading conditions. Strength and deformation properties of soils were evaluated based on the results of testing taking into account natural conditions and its physical state. It was established that the loading mode affects deformation modulus value for the same soil up to one order.

**Findings.** The developed computational scheme takes into account the combination of natural, geological, and geodynamic factors using the complex energy and mechanistic models. The new notion named 'slope activation potential' has been proposed as a result of analysis of the field of physical gradients obtained by means of modeling. It was established that the deformation dynamics of a loess slope depends on character of natural geological genesis of sediments and varying geodynamic factors. The proposed technique for modeling of the loess soils stability takes into account the combination of determinants as a finite element discretization of a slope by the equations of deformation continuity and gravity field where anthropogenic and genetic components have been introduced.

**Originality.** The notion of 'landslide loess massif activation potential' required for adequate description of the processes occurring in the loess soils has been formulated.

**Practical value.** The proposed concept of loess slope activation and its ranges enables distinguishing the different phases of landslides processes. The developed approach has been applied to the site located on the slope of Tunnelna gully in the city of Dnipropetrovsk.

**Keywords:** loess soils, energy of a slope, subsidence, triaxial testing of soil, slope activation potential, numerical modeling

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
О.М. Кузьменком. Дата находження рукопису 14.10.11*