

Д-р техн. наук, проф. В.Д. Петренко,  
инж. Т.А. Селихова,  
канд. техн. наук, доц. А.Л. Тютюкин  
(ДИИТ)

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ  
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
УСЛОВИЯХ**

В статті наведені результати аналізу проблеми дослідження основ транспортних споруд при динамічних діях з урахуванням складних інженерно-геологічних умов України з позиції будівництва швидкісних магістралей.

**ANALYSIS OF THE INVESTIGATION PROBLEM  
OF THE TRANSPORT BUILDINGS BASES UNDER DYNAMIC ACTIONS  
IN DIFFICULT ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS**

The results of the problem analysis of the bases investigation of the transport buildings under dynamic actions with regard to for difficult engineering and geological conditions of the Ukraine with positions construction speed railways are brought in the article.

В связи с увеличением объемов транспортного строительства, связанного с улучшением экономических показателей в сфере транспорта в целом и разработкой программ создания скоростных магистралей Украины, в частности, возник ряд серьезных проблем. Эти проблемы вызваны необходимостью создания условий нормальной эксплуатации различных транспортных сооружений как строящихся, так и находящихся в стадии реконструкции или переоборудования под скоростное движение. Причем известно [1], что большая часть строящихся объектов находятся в сложных инженерно-геологических условиях. Так, например, в Украине, СНГ и государствах ближнего зарубежья грунтовые основания представлены слабыми, структурно-неустойчивыми, просадочными и неоднородными образованиями, что влечет за собой повышенные требования к возводимым на них или реконструируемым транспортным сооружениям, к которым относятся трубы, путепроводы мостового и тоннельного типов и некоторые другие.

Инженерно-геологические условия, особенно в пределах Украины, отличаются большим разнообразием, что вызвано наличием сложноструктурных формаций как коренной основы, так и поверхностных отложений. При этом структура коренной основы представлена следующими грунтовыми формациями: наиболее глубокие (нижняя терригенная, карбонатная, каневский ярус) – прочные песчаники, глины, прочный мел, переслаиваемые песками; ближе к поверхности – темные среднечные глины; средние (бучакский, киевский и харьковский ярусы) – прочные мергели, известковые глины (типа спондиловых), песчаники средней прочности, линзы песков с конкрециями песчаников; формации (тортонский, сарматский и меотический ярусы) – среднечные из-

вестняки, ракушечники, мергели, линзы песков, слои средне- и малопрочных глин. Преимущественное распространение имеют породы нижнего неогена – прочные и средней прочности.

Поверхностные отложения над коренной основой отличаются еще более сложным характером распространения и структурой залегания, что обусловлено напластованием, многочисленными выклиниваниями, линзами, наличием площадей моренных суглинков и т.д. Чередование песчанистых глин и песков харьковского яруса с различной прочностью, песков с подстиланием пестрых глин полтавского яруса, бурых и пестрых слабопрочных глин и суглинков с наличием линз песка, приуроченных к континентальным отложениям верхнего миоцена и плиоцена и выходящих на поверхность, предопределяет сложность строительства и эксплуатации транспортных сооружений на этих территориях. Кроме того, большая часть грунтовых отложений, представленных красно-бурыми и бурыми глинами и суглинками, песками с линзами суглинков, покрытыми чехлом лессовых пород, днепровская морена и горизонты погребенных почв в лессовых толщах подтверждают также неблагоприятность условий строительства транспортных объектов. На рис.1.1 представлена карта расположения лёссовых грунтов в Украине (около 60 % площади) [2].

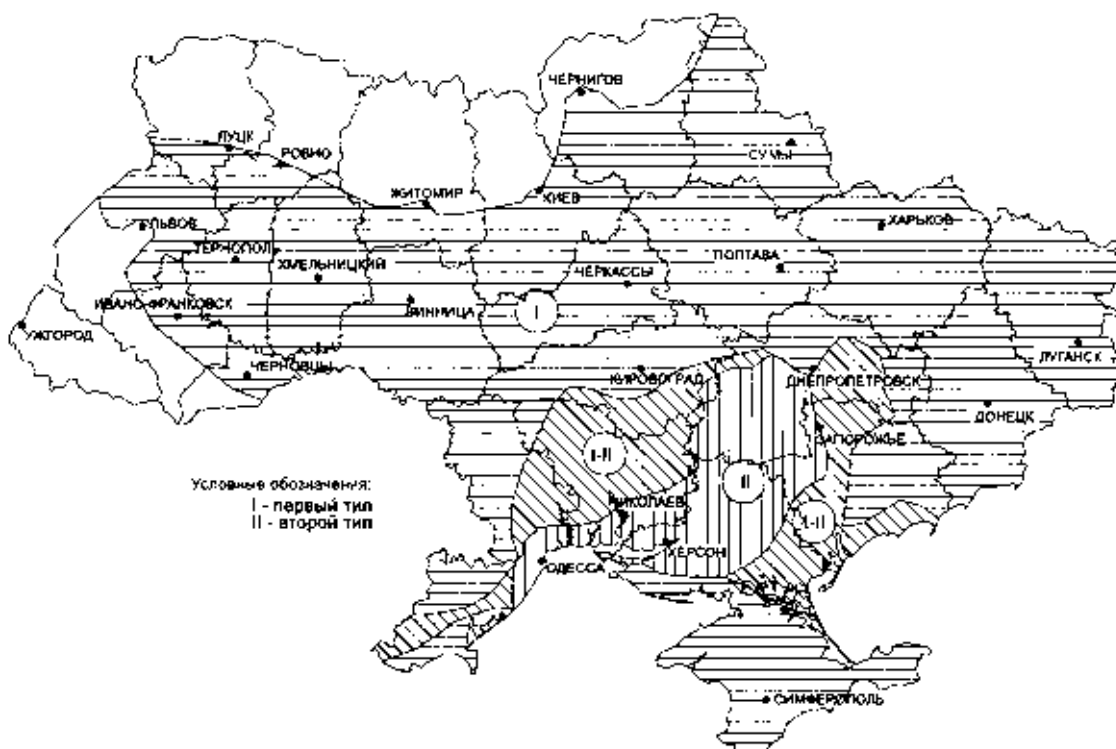


Рис. 1. – Схема расположения лёссовых грунтов по типу просадочности

Из представленных данных следует, что разнообразие сложных инженерно-геологических условий доказывает особую важность расчета оснований в случае неоднородных (подразумевается изменение свойств по высоте в массивах, сложенных достаточно прочными породами), слоистых (массивы с явно выра-

женными слоями грунтов с различными свойствами и характером залегания), структурно-неустойчивых (лессоподобные породы) и слабых (прочность от 3 до 10 МПа на сжатие) грунтовых основаниях. Следует отметить, что сложность инженерно-геологических условий приводит к тому, что понимание важнейших процессов, происходящих при взаимодействии нагрузок с транспортными сооружениями на грунтовых основаниях, часто бывает затруднено из-за отсутствия надежной информации и, как следствие, имеются ограниченные возможности прогнозирования основных факторов этого взаимодействия. Причем указанные сложности связаны как со стадией проектирования и расчета, так и со стадией сооружения конструкций. При этом даже достаточный объем знаний о конструктивных особенностях транспортного сооружения в целом не решает проблемы его поведения во взаимодействии с грунтовыми основаниями, которые представлены слабыми, структурно неустойчивыми и неоднородными грунтами. Отсутствие представительной информации или недостаточная изученность вопросов, связанных с их совместной работой с учетом взаимодействия в системе «транспортное сооружение – грунтовый массив» приводит к двум возможным последствиям в процессе эксплуатации такого сооружения.

Во-первых, при недостатке информации о поведении слабых, структурно неустойчивых и неоднородных оснований могут быть не учтены их недопустимые деформации и, как следствие, могут возникнуть затрудненные или аварийные условия эксплуатации транспортного сооружения, связанные с потерей прочности и устойчивости самой конструкции, трещинообразованием и уменьшением ее габаритных размеров. Причем, стоит отметить, что развитие деформаций в случае неоднородных оснований часто проявляется в их неравномерности, вызывающих крен фундаментов и всего сооружения, что, в свою очередь, требует исправления последствий и ведет к перерасходу средств на эксплуатацию транспортных сооружений.

Во-вторых, неполная информация о напряженно-деформированном состоянии (НДС) такого вида оснований приводит к проектированию транспортных сооружений из более прочных и жестких конструкций, применения специальных фундаментов, а также специальных способов сооружения транспортных объектов, что значительно повышает строительные затраты. При этом отсутствие прогноза поведения таких конструкций не дает возможности создать в процессе эксплуатации оптимальные условия их работы. Это, в свою очередь, ведет к недопустимым деформациям основания и, как следствие, к увеличению эксплуатационных затрат.

Проанализированные последствия строительства и эксплуатации транспортных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, представленных слабыми, структурно неустойчивыми, слоистыми и неоднородными основаниями, свидетельствуют об актуальности поиска решений, связанных с определением НДС таких оснований с учетом их взаимодействия с указанными конструкциями. Причем прогнозирование поведения системы «сооружение–основание» позволит заранее на стадии проектирования получить обстоятельную

и наиболее полную информацию о возможных последствиях такого взаимодействия и оперативно применить наиболее рациональные способы корректировки последствий для улучшения эксплуатационных свойств сооружения.

Специфической особенностью работы транспортных сооружений является восприятие ими динамических воздействий от движущегося транспорта. Такие воздействия в совокупности с разнообразием мест их приложения на транспортное сооружение существенно усложняют расчеты НДС его основания ввиду необходимости обязательного учета не только силовой, но и инерционной составляющей. При этом быстро изменяющиеся во времени по величине и направлению динамические воздействия вызывают волновые колебания как транспортного сооружения, так и основания, на котором оно установлено. Чаще всего для рассматриваемых транспортных сооружений в виде труб, путепроводов различного типа, автомобильных подземных проездов сооружение является той частью системы, которая воспринимает колебания от движущегося источника. Чаще всего им является железнодорожный состав, причем его движение может происходить с воздействием на основание как прямо, так и косвенно. В случае прямого воздействия через небольшую трубу или путепровод тоннельного типа при езде поверху в структурно-неоднородном или слоистом основании возникают серьезные просадки, которые ведут к аварийным ситуациям вследствие постоянного роста и накопления деформаций грунта. При косвенном динамическом воздействии через опору и фундамент опоры в путепроводах мостового типа накапливающиеся деформации в виде кренов фундамента на слоистом основании также ведут к потере устойчивости сооружения и, соответственно, к затрудненной его эксплуатации.

Значительные осадки и крены фундаментов являются не единственными отрицательными явлениями в грунтовом массиве, которые образуются под действием динамической нагрузки. Явления разжижения, виброкомпрессии и виброползучести, связанные с динамическим воздействием на структуру грунта и при ее изменении (снижение сопротивления сдвигу, уплотнение рыхлой части скелета, динамическая усталость) ведут к опасным последствиям, которые ухудшают нормальную эксплуатацию транспортных сооружений. Именно эти явления, сопутствующие динамическим воздействиям на грунтовое основание и ведущие к аварийной эксплуатации, требуют дополнительных расчетов оснований, учитывающих не только статические, но и динамические нагрузки на них.

Следует отметить, что сложность поведения сооружений и грунтовых оснований при динамических нагрузках существенно выше чем при статических, причем в расчетах НДС оснований требуется оценивать влияние многих факторов, которые не учитываются в статических расчетах. Существующие аналитические положения разделяют область динамических расчетов на динамику сооружений и динамику грунтов [3]. Такое деление тенденциозно и вместе с тем применяется и для статических расчетов оснований, хотя оно и является значительным упрощением реальной работы системы «сооружение–основание». Совместное рассмотрение и анализ этой системы, как единственно верный подход

к исследованию реального сооружения и основания, отмечали М.Н. Гольдштейн [4], С.С. Вялов [5], М.В. Малышев [6] и другие исследователи. Но применение этого подхода до сих пор не нашло широкого распространения по причине сложности одновременного анализа обеих частей системы «сооружение–основание», которая в случае динамического воздействия существенно повышается. Вместе с тем, стремление к достижению расчетных показателей, наиболее адекватных реальным параметрам НДС, заставляет находить некоторые способы учета как статических, так и динамических воздействий на сооружение и грунтовое основание.

Как известно, динамика сооружений на грунтовых основаниях достаточно глубоко проработана в области расчетов фундаментов различного типа под машины и оборудование с динамическими нагрузками [6-9]. Положения проектирования и расчета фундаментов машин под динамические нагрузки достаточно разработаны в соответствии с требованиями СНиП 2.02.05.-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» по двум группам предельных состояний, но с уточнением, что основание должно удовлетворять условию однородности и изотропности. Инженерные расчеты на основе этих положений соответствуют тенденции анализа системы «сооружение (фундамент)-основание», а не ее частей, базируясь на упрощениях, облегчающих расчет [10, 11]. На основе этих упрощений машина с фундаментом рассматривается как массивное тело с единым центром масс, а грунтовое основание рассматривается невесомым, но способным к упруго-вязкому деформированию (модель Винклера-Кельвина-Фойгта). Достоинством такого подхода является то, что определение динамических характеристик системы производится аналитически с помощью решения системы дифференциальных уравнений. Недостатками этих упрощений являются следующие: не слишком корректная замена весомого массива невесомым, необходимость поиска упругих и вязких (демпфирующих) характеристик основания в лабораторных условиях, отсутствие информации о динамических параметрах основания.

В настоящее время в ограниченном числе работ достаточно глубоко разработана область динамических расчетов фундаментов в условиях сейсмического воздействия [12], но подход к расчету фундамента с упрощением свойств оснований позволяет получать лишь результаты в узких рамках взаимодействий в системе «сооружение–основание».

Основным недостатком современного подхода к исследованию поведения сооружения и основания является ограниченная информация о поведении грунтового основания при ее достаточном объеме о самом сооружении. Особенность этого подхода дает более точные результаты в определении динамических характеристик сооружения, но недостаточное знание деформированного состояния при динамических воздействиях на транспортные сооружения ведет к отрицательным последствиям при их проектировании. Кроме того, отсутствие прогноза ситуации приводит к проектированию нерациональной конструкции. Вместе с тем, получение достаточного объема аналитических данных о дина-

мическом поведении сооружения, путем определения его амплитудно-частотных характеристик и форм колебаний не всегда сопровождается получением достаточного количества данных о действующих силовых факторах в сооружении и основании, то есть определение напряжений и деформаций отходит как бы на второй план. Такая ситуация приводит к одностороннему пониманию поведения системы «сооружение–основание», что, в свою очередь, сопровождается неполным учетом специфических свойств основания, неверным проектированием и осложненной эксплуатацией транспортных сооружений.

Решение задач динамики сооружений и грунтов с помощью МКЭ открывает новые возможности для анализа системы «сооружение–основание». Достаточно теоретически разработанная динамическая задача МКЭ [13] позволяет проводить модальный анализ (определение характеристик собственных колебаний) и анализ динамических параметров при вынужденных колебаниях, причем спектр воздействий может быть достаточно широк: периодические нагрузки, импульсные и ударные воздействия с различным видом импульса и временем его действия, сейсмическое воздействие. Существенным достоинством МКЭ является возможность как анализа специфических динамических параметров (анализ частот и форм колебаний), так и анализ НДС исследуемого сооружения при тех же нагрузках. Следовательно, информация, полученная с помощью МКЭ о поведении сооружения, является наиболее полной. Основным недостатком применения МКЭ при анализе динамических характеристик и параметров НДС системы «сооружение–основание» является отсутствие достаточного теоретического обоснования совместного поведения обеих ее частей под действием динамической нагрузки. Но данный недостаток присущ скорее не теоретическим основам МКЭ, а возможностям интерпретации грунтового основания и его поведения под действием динамической нагрузки. Таким образом, недостаточный объем исследований и устаревшие модели оснований требуют нахождения новых путей решения этой проблемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.В. Инженерная геология СССР. Часть II. Европейская часть СССР. – М.: Изд-во Московского университета, 1965. – 477 с.
2. Черний Г.І., Черний В.Г. Геотехнічні процеси в складних ґрунтових умовах України / Світ геотехніки. – 2000. – С. 4-9.
3. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Н. Чернышев. – М.: АСВ, 1994. – 577 с.
4. Гольдштейн М.Н. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений. – К.: Будівельник, 1977. – 208 с.
5. Вялов С.С. Осадки и контактные давления нелинейно-деформируемого основания при полосовой нагрузке // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 6. – С. 15-20.
6. Шевченко М.И. О результатах решения задачи об устойчивости фундамента различными методами // Геотехника в строительстве, Днепропетровск: ДИИТ, 1970. – Вып. 4. – С. 38-45.
7. Синицын А.П. Расчет балок и плит на упругом основании за пределом упругости. – М.: Стройиздат, 1964. – 45 с.
8. Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений. – Л.: Стройиздат, 1970. – 207 с.
9. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Харьков: Изд-во «Основа» при харьковском ун-те, 1991. – 272 с.
10. Забылин М.И. Практический метод расчета фундаментов на прочность от вертикальных импульсных нагрузок // Изв. вузов «Строительство и архитектура». – 1972. – № 10. – с. 20-24.

11. Пятецкий В.М., Кунцевич А.О. Упрощенные формулы для расчета массивных и стенчатых фундаментов под машины с динамическими нагрузками // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1988. – № 3. – С. 14-16.

12. Кушнер С.Г. Расчет осадок оснований зданий и сооружений. – К.: Будівельник, 1990. – 142 с.

13. Киричек Ю.А. Комбинированные массивно-плитные фундаменты. Ресурсосберегающие методы расчета и проектирования. – Днепропетровск: Изд-во Приднепровской госуд. академии строит. и арх., 2001. – 207 с.

**УДК 622.023.23:539**

Канд. техн. наук Г.І. Ларіонов,  
м.н.с. А.В. Пазинич, м.н.с. С.М. Пилипчук,  
інж. К.В. Цепков (ИГТМ НАН Украины)

## **ДО РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПЛАСТІВ ПРИ ГІДРОВІДЖИМІ**

В работе дана сравнительная характеристика двух классов численных методов – метода конечных элементов (МКЭ) и метода граничных элементов (МГЭ). Отмечены преимущества МГЭ по сравнению с МКЭ для решения пространственной задачи теории упругости. Численное решение плоской задачи о растяжении бесконечной пластины с отверстием в центре методом МГЭ сравнивалось с точным решением (задача Кирша). Полученные графики относительной погрешности решения позволили сделать вывод о хорошей точности и применении его для расчёта напряжённо-деформированного состояния вокруг скважин при гидроразрыве.

## **ON STRESS-STRAIN CALCULATION METHODS TO HYDRORUPTURING BOREHOLE**

Paper is devoted to the working method choice from two class finite element (MFE) and boundary element (MBE) methods. Pointed out the MBE advantages to space elastostatic task solve. The results of flat MBE solve of nonfinite tensile plate with central hole were compared with analytic exact solve (Kirsch's task). Relative error evaluating plots and detail analyses permit to made conclusion about effectiveness of MBE methods and that make convenient using of MBE to stress-strain state calculation within hydrorupture borehole.

Збільшення темпів видобування корисних копалин тісно пов'язано зі збільшенням інтенсивності ведення гірничих робіт що приводить до суттєвих змін природного напруженого стану гірських порід. Так при видобуванні вугілля швидка зміна напружено-деформованого стану у викидонебезпечних пластах часто приводить до динамічного прояву гірського тиску як то гірський удар або викид.

Одним з факторів орієнтуючись на який, виявляють стан маси вугілля близький до критичного є кількість метану, що виділяється [1]. Більш того, навіть якщо гірничі роботи ведуться не у викидонебезпечних пластах то велика кількість метану, що виділяється у виробку може значно знизити темпи ведення робіт по газовому фактору. Для усунення цих перешкод і для збільшення інтенсифікації видобування необхідно забезпечити ефективну дегазацію розроблюваних пластів.

Найбільшого поширення набули методи дегазації у зоні ведення гірничих