



КУШНЕР САМУИЛ ГЕЦЕЛЕВИЧ

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, член Международного общества по механике грунтов и геотехническому строительству, научный консультант и советник главы г. Днепропетровска по вопросам градостроительства.

Основные направления деятельности: расчет и проектирование зданий и сооружений на структурно-неустойчивых грунтах; разработка методов прогноза осадок оснований фундаментов; исследование причин деформаций и аварий строительных объектов, разработка методов их восстановления и усиления; проблемы экологии строительства.

Автор более 70 опубликованных работ.

E-mail: o.frankfurt@qmx.de

УДК 624.131.37

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВАНИЙ ОТ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТИ

Ключевые слова: деформации оснований, аварии, виды нагрузок, напряжения

Отмечено, что усложнение геотехнических задач требует повышения точности расчета совместных деформаций оснований и сооружений. Показано, что это, в свою очередь, вызывает необходимость более всеобъемлющего учета факторов, влияющих на деформации оснований (осадки и их неравномерность). Подчеркнуто, что в сложных современных условиях строительства весьма важно правильно учитывать все виды нагрузок на поверхности, которые могут воздействовать на основания рассчитываемых фундаментов и увеличивать их осадки. Приведены формулы для определения напряжений от основных видов нагрузок на поверхности, в том числе от нагрузок, расположенных на половине и четверти граничной плоскости полупространства, полосе полубесконечной протяженности, угле ленточного фундамента. Получена более простая формула, определяющая напряженное состояние под равномерно загруженным прямоугольником, которая может способствовать отказу от использования метода угловых точек. Приведены примеры аварийных деформаций сооружений из-за неучета нагрузок на поверхности.

Відзначено, що ускладнення геотехнічних завдань вимагає підвищення точності розрахунків спільних деформацій основ і споруджень. Показано, що це, у свою чергу, викликає необхідність більш всеосяжного обліку факторів, що впливають на деформації підстав (опадки і їх нерівномірність). Підкреслено, що в складних сучасних умовах будівництва досить важливо правильно враховувати всі види навантажень на поверхні, які можуть впливати на підстави фундаментів, що розраховуються, і збільшувати їхні опадки. Наведені формули для визначення напруг від основних видів навантажень на поверхні, у тому числі від навантажень, розташованих на половині й чверті граничної площини півпростору, смуги напівнескінченної довжини, куті стрічкового фундаменту. Отримана більш проста формула, що визначає напружене стан під рівномірно завантаженим прямокутником, яка може сприяти відмові від використання методу куткових крапок. Наведені приклади аварійних деформацій споруджень через неврахування навантажень на поверхні.

It is noticed that complication of geotechnical problems demands increase of calculation accuracy of joint deformations of the bases and constructions. It is shown that it causes more comprehensive consideration of the factors influencing on deformations of the bases (settlements and their non-uniformity). It is stressed that rather important in difficult modern conditions of building correctly to consider all kinds of loadings on surface which can influence on the bases of design foundations and increase their settlements. The formulas for stresses definition from the basic types of loads on the surface including from the load located on half and a quarter of boundary plane of semispace, strip of semi-infinite extent, angle of strip foundation are presented. More simple formula is received, it defines stress state under evenly loaded rectangle, it can promote to refusal of use of angular points method. Examples of emergency deformations of constructions because of not definition of loads on the surface are presented.

1. О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ И ВИДАХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТИ

Происшедшее в последние десятилетия резкое усложнение решения геотехнических задач, обусловленное возросшими объемами строительства высотных зданий и подземных сооружений (далее по возможности сооружений) в стесненных условиях городской застройки, увеличением их заглубления, ростом нагрузок на основания и скорости возведения сооружений, неблагоприятными грунтовыми условиями, сложным рельефом, конструктивными особенностями сооружений и окружающей застройки и т. д., требует повышения точности расчета совместных деформаций оснований и сооружений за счет:

- принятия во внимание возможности проявления значительных начальных осадок и осадок, вызванных ползучестью грунта;
- более точного учета факторов, влияющих на совместные деформации оснований и сооружений (осадки равномерные и неравномерные, крены).

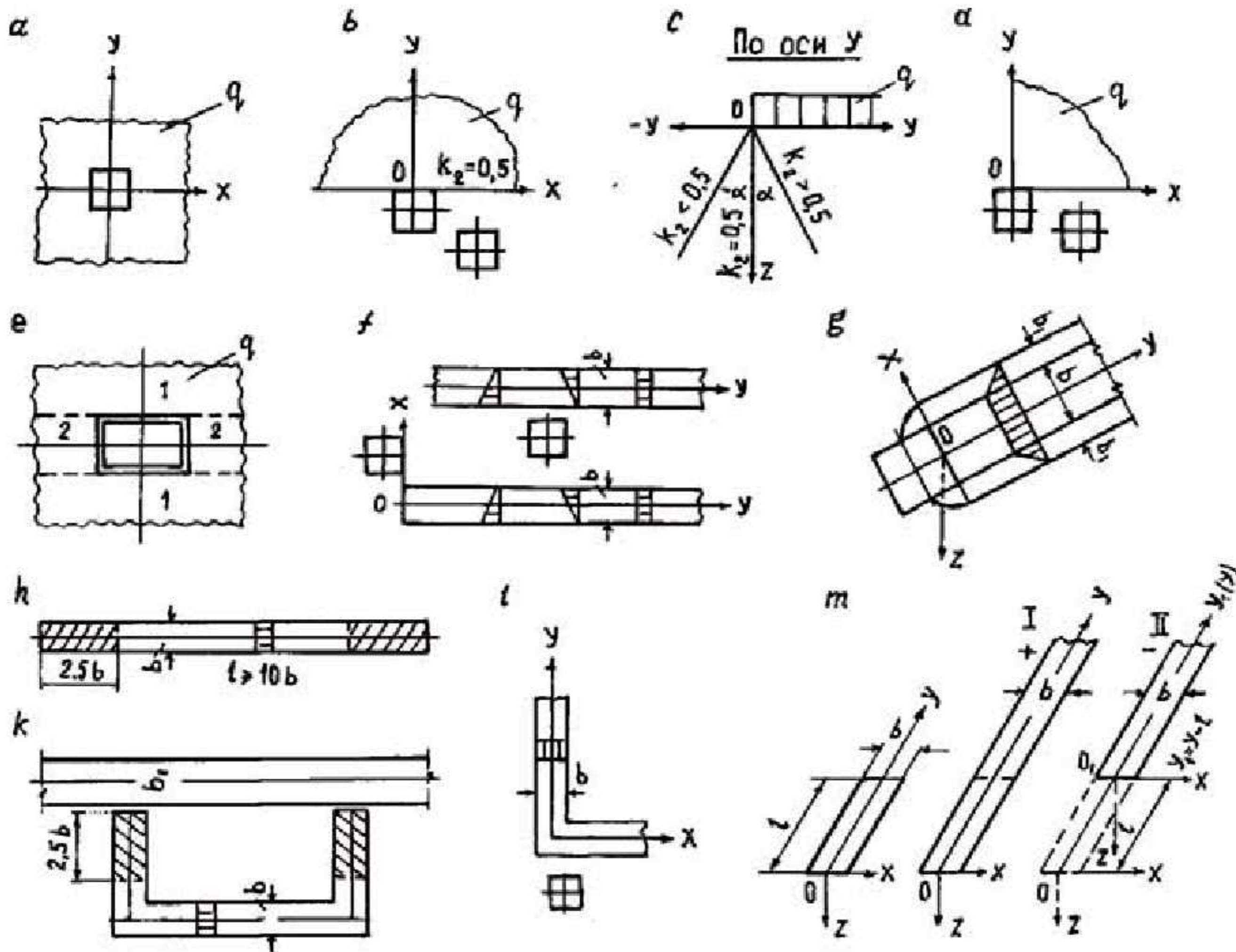


Рис. Схемы нагрузок на поверхности

Одним из таких факторов являются воздействующие на сооружения нагрузки на поверхности. Они создаются:

- планировочными насыпями;
- обсыпками наземных емкостей и резервуаров;
- подходными насыпями к устоям мостов (путепроводов);
- пристройками к существующим зданиям;
- штабелями сыпучих и других материалов;
- нагрузками на полах по грунту;
- влиянием соседних фундаментов (их заглубление учитывается пригрузкой);
- кранами, движущимися вдоль строящихся зданий;
- движущимся транспортом и другими воздействиями.

2. ПЛАНИРОВОЧНЫЕ НАСЫПИ

Планировочные насыпи большой протяженности, выполняемые вокруг сооружений и воздействующие на фундаменты сооружений, если высота этих насыпей постоянна (равномерная нагрузка), создают внутри грунтового массива напряженное состояние, отвечающее условиям одномерной задачи (сжатие без возможности бокового расширения), т. е. напряжения с глубиной не убывают.

Если планировочная насыпь выполняется на местности с продольным уклоном и имеет переменную высоту, то распределение вертикальных нормальных напряжений σ_{zq} в основании можно представить формулой

$$\sigma_{zq} = k_i q + k_{\Delta} q_0, \quad (1)$$

где k_i и k_{Δ} - коэффициенты, учитывающие соответственно равномерную и треугольную нагрузку; q и q_0 - интенсивность равномерной и максимальная ордината треугольной нагрузки.

При равномерной нагрузке ($q_0 = 0, \sigma_{zq} = k_{iq}$) может иметь место несколько случаев загрузки граничной плоскости полупространства:

1. Нагрузка сплошная, т. е. расположена на всей граничной плоскости полупространства и коэффициент k_i определяется (рис. а) в виде

$$k_i = k_1 = 1. \quad (2)$$

2. Нагрузка односторонняя (полубесконечная), т. е. расположена на половине граничной плоскости и коэффициент k_i определяется (рис. б, с) по формуле (Кушнер, 1989)

$$k_i = k_2 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{xz}{x^2 + z^2} + \arctg \frac{x}{z} + \frac{\pi}{2} \right], \quad (3)$$

где x, y, z - текущие координаты. На вертикали, проведенной через произвольную точку граничной линии между загруженной и незагруженной частями граничной плоскости полупространства ($y = 0$) при любых значениях z , имеем

Таблица. Значения коэффициента k_2 при различных углах α

$tg\alpha$	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	3,00	6,00	∞
k_2	0,500	0,653	0,775	0,858	0,909	0,941	0,960	0,980	0,993	0,999	1,0
$tg\alpha$	0,00	-0,25	-0,50	-0,75	-1,00	-1,25	-1,50	-2,00	-3,00	-6,00	$-\infty$
k_2	0,500	0,347	0,225	0,142	0,091	0,060	0,041	0,020	0,007	0,001	0,0

$$k_i = k_2 = 0,5. \quad (4)$$

По мере удаления от оси x вдоль оси y в направлении загруженной части граничной плоскости коэффициент k_2 возрастает, а в противоположном направлении, где часть граничной плоскости не загружена – убывает. Вдоль луча, проведенного через упомянутую точку под некоторым углом α к вертикали, напряжения постоянны ($k_2 = const$) и превышают напряжения на вертикали с ростом угла α по абсолютной величине. Рост напряжений со стороны нагрузки и убывание – с противоположной стороны отражены в таблице.

С учетом настоящей таблицы можно определять влияние односторонней (полубесконечной) нагрузки на фундаменты, расположенные на некотором удалении от граничной линии нагрузки как под нагрузкой, так и за ее пределами.

3. Нагрузка расположена на четверти граничной плоскости, и коэффициент k_i находится (рис. d) по формуле (Кушнер, Хаин, 1996)

$$k_i = k_3 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{x}{z} + \arctg \frac{y}{z} + \arctg \frac{xy}{zR} + z \left(\frac{x}{x^2 + z^2} + \frac{y}{y^2 + z^2} + \frac{xy(x^2 + y^2 + 2z^2)}{(x^2 + z^2)(y^2 + z^2)R} \right) \right], \quad (5)$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

Это решение получено двойным интегрированием в пределах от 0 до ∞ выражения, определяющего вертикальные нормальные напряжения от элементарной сосредоточенной силы.

Анализ решения (5) показывает, что:

- на вертикали, проведенной через начало координат $[0, 0, z]$, коэффициент $k_3 = 0,25$;
- по мере удаления от начала координат вдоль осей x или y коэффициент k_3 достаточно быстро возрастает, а на некотором расстоянии от начала координат на вертикали, проведенной через произвольную точку, лежащую на осях x или y , он достигает постоянного значения $k_3 = 0,5$;
- при $x > 0, y = 0, z > 0$ или $x = 0, y > 0, z > 0$ коэффициент $k_3 = 0,5 k_2$, где k_2 отвечает формуле (3);
- при $x \rightarrow \infty, y > 0, z > 0$ или $x > 0, y \rightarrow \infty, z > 0$ коэффициент k_3 [решение (5)] совпадает с коэффициентом k_2 [решение (3)].

4. Коэффициент k_{Δ} , учитывающий треугольную нагрузку, определяется из решения для полосовой нагрузки необходимой ширины для полосы бесконечной длины (Герсеванов, 1933) или полубесконечной протяженности по формуле (7).

Такой прием определения напряжений от планировочной насыпи переменной высоты по формуле (1) был использован автором при определении осадок сооружений, возведенных на свежесыпанной насыпи большой высоты,

подстилаемой замоченными лессовыми грунтами (Кушнер, 1990).

3. ОБСЫПКИ НАЗЕМНЫХ ЕМКостей И РЕЗЕРВУАРОВ

Будем считать, что емкость малых размеров, если соблюдается условие $b \leq 10$ м, и больших размеров, если $b > 10$ м, где b – ее ширина или диаметр. Для прямоугольных емкостей длиной l ширина $b < l$.

При выполнении вокруг прямоугольных или круглых емкостей (резервуаров) сплошной планировочной насыпи рекомендуем определять напряжения от обсыпки:

- для емкостей малых размеров – по пункту 1 раздела 2;
- для прямоугольных емкостей больших размеров, исходя из принципа независимости действия сил – в качестве одного из возможных вариантов – по схеме (рис. e) в виде комбинации двух загруженных полос полубесконечной протяженности – поз. 2, примыкающих к менее протяженным стенкам емкости и двух площадей, примыкающих к длинным сторонам емкости и загруженных односторонней (полубесконечной) нагрузкой – поз. 1; в первом случае напряжения можно определять по формуле (6) для полубесконечной полосовой нагрузки, во втором – по пункту 2 раздела 2 – по формуле (3);
- для круглых емкостей больших размеров в первом приближении можно рассматривать нагрузку от выполненной вокруг сплошной обсыпки как такую же сплошную нагрузку вокруг эквивалентной по площади квадратной емкости по схеме, представленной на рис. e.

Автором описан случай (Кушнер, 1989) деформаций открытого резервуара (размерами 36 x 48 x 5,1 (h) м, вокруг которого после его возведения была выполнена планировочная насыпь высотой 4,5 м. Со стороны длинных сторон резервуара она имела большую протяженность (полоса полубесконечной длины), со стороны коротких сторон – малую из-за ограничения существующими автодорогами. Через 2,5-3,0 месяца после завершения отсыпки в поперечных наружных и внутренних стенах с двух сторон возникли трещины с раскрытием сверху до 7 мм и затухающие к низу, так как проектировщики не учли воздействие вертикальных нормальных напряжений σ_{zq} от планировочной насыпи, примыкающей к длинным сторонам резервуара (резервуар претерпел перегиб). Трещины ликвидировали путем установки у верхней кромки стен тяжелой, подвергнутой предварительному напряжению.

4. ПОДХОДНЫЕ НАСЫПИ К УСТОЯМ МОСТОВ (ПУТЕПРОВОДОВ)

С расчетной точки зрения подходная насыпь к устью моста (путепровода) может рассматриваться как полоса полубесконечной протяженности, загруженная трапецидальной нагрузкой или равномерной и двумя треугольными нагрузками (рис. f, g). Поскольку полосовая нагрузка с одного конца ограничена, а с другого – простирается до бес-

конечности, то мы имеем дело с пространственной задачей. Такая задача для полос, нагруженных равномерно и по закону треугольника, была решена автором в содружестве с Хаиным (Кушнер, Хаин, 1996). Приводим это универсальное решение, которое позволило получить ряд других решений, а также осуществить переход к известным решениям ряда плоских задач.

Вертикальные нормальные напряжения σ_{zq} на произвольной вертикали под полосой шириной b и за ее пределами определяются в виде:

для равномерной нагрузки - по первому члену формулы (1), где

$$k_i = k_4 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{m_i}{z} + \operatorname{arctg} \frac{m_i y}{z R_i} + \frac{m_i z}{R_i} \cdot \left[\frac{R_i + y}{m_i^2 + z^2} + \frac{y}{y^2 + z^2} \right]_{m_2}^{m_1} \right\} = \frac{1}{2\pi} [F(m_1) - F(m_2)] \quad (6)$$

$$m_1 = x + b/2; \quad R_1 = \sqrt{m_1^2 + y^2 + z^2};$$

$$m_2 = x - b/2; \quad R_2 = \sqrt{m_2^2 + y^2 + z^2};$$

для треугольной нагрузки - по второму члену формулы (1), где

$$k_\Delta = \frac{1}{2\pi b} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{B_i}{z} + \operatorname{arctg} \frac{B_i y}{z R_i} + \frac{z}{2} \left[\frac{B_i}{B_i^2 + z^2} \left(2 + 3 \frac{R_i}{y} \right) - \frac{B_i}{y R_i} \left(\frac{y^2}{B_i^2 + z^2} + \frac{y^2 + 3z^2}{y^2 + z^2} \right) \right] - \frac{z^3 (R_i + y)}{x R_i (B_i^2 + z^2)} \right\}_{B_2}^{B_1} = \frac{1}{2\pi b} [f(B_1) - f(B_2)] \quad (7)$$

$$B_1 = b - x; \quad R_1 = \sqrt{B_1^2 + y^2 + z^2};$$

$$B_2 = -x; \quad R_2 = \sqrt{B_2^2 + y^2 + z^2};$$

начало координат располагается в торце полосы в точке с нулевой ординатой треугольной нагрузки, т. е. в вершине острого угла треугольника, а ось y проходит вдоль полосы по ее краю.

Формулы (6) и (7) удовлетворяют граничным условиям и условиям на бесконечности, а их универсальность подтверждается вытекающими из этих формул частными решениями.

Из формулы (6):

- получаем (при $y \rightarrow -\infty$) известное частное решение Митчела-Колосова для равномерно нагруженной полосы бесконечной протяженности (плоская задача);
- приходим (при $b/2 \rightarrow \infty$ и $-b/2 \rightarrow -\infty$) к решению (3) для односторонней (полубесконечной) равномерной нагрузки, расположенной на половине граничной плоскости полупространства.

Для случая равномерной нагрузки нами найдены все компоненты напряжений (Кушнер, Хаин, 1999).

Из формулы (7) при $y \rightarrow -\infty$ получаем упомянутое в разделе 2 п. 4 частное решение Герсеванова для полосы бесконечной длины, нагруженной треугольной нагрузкой (плоская задача).

Длительное время в расчетах осадок оснований устоев мостов (путепроводов) воздействию напряжений σ_{zq} от подходных насыпей вообще не учитывалось или после 1957 г. учитывалось от полосовой нагрузки бесконечной длины при высоте насыпей более 12 м.

Такие требования норм проектирования мостов обусло-

вили возникновение аварийного состояния на ряде путепроводов, где высота насыпей не превышала 10 м.

Приведем данные наших наблюдений за длительными неравномерными осадками опор ж.д. четырехпролетного путепровода длиной 103,9 м на подъездном пути к коксохимзаводу - Днепродзержинск (Кушнер, Резников, 1993; Кушнер, 2004). Фундаменты опор путепровода заглублены ниже планировочной отметки на 3,2 - 4,4 м и опираются на мощную лессовую толщу замоченных сильно сжимаемых грунтов. За период эксплуатации с 1952 по 1988 г уровень подземных вод (УПВ) поднялся на 14,0 - 16,1 м и установился на глубине 2,6 м от поверхности планировки.

Причинами аварийных неравномерных осадок опор, особенно устоев с наклоном их в сторону насыпей, вызвавших увеличение расстояния между шкафными стенками устоев на 0,74 м, разрушение опорных частей, анкерных болтов и необходимость неоднократного наращивания пролетных строений, явились как непрерывный подъем УПВ и повышение сжимаемости грунтов, так и неучтенная односторонняя пригрузка оснований фундаментов устоев подходными насыпями высотой до 10 м.

Полная осадка задних граней устоев № 1 и № 5 составила 363+357=720 мм и 152+138 = 290 мм, где первые цифры означают долю осадки за счет повышения сжимаемости замоченных лессовых грунтов, а вторые - долю осадки, вызванную неучтенной нагрузкой от подходных насыпей.

Подобные деформации с наклоном устоев в сторо-

ну подходных насыпей такой же высоты претерпел автодорожный двухпролетный путепровод длиной 45,2 м (Днепродзержинск). И здесь не было учтено давление от подходных насыпей. Основанием фундаментов путепровода служат лессовые просадочные грунты естественной влажности. Каждый из проектных зазоров между пролетными строениями, а также между пролетными строениями и устоями составлял 50 мм. Здесь имело место два этапа деформирования.

Возникновение аварийного состояния на I этапе (1995 г.) с увеличением расстояния между шкафными стенками устоев на 293 мм ошибочно объяснили замачиванием грунта и просадками. Реальные причины подобных деформаций были указаны в работе (Кушнер, Резников, 1993). Эта ошибка вылилась в подведение свай \varnothing 300 мм и длиной 20 м под опоры путепровода. После повторной отсыпки насыпей у устоев и II этапа деформаций (1998 г.) расстояние между шкафными стенками устоев возросло до 438 мм, что потребовало удлинения пролетного строения $l = 33$ м. Полагаем, что давление на основания устоев от примыкающих насыпей следует учитывать при любой их высоте.

5. ПРИСТРОЙКИ К СУЩЕСТВУЮЩИМ ЗДАНИЯМ

Из формулы (6) следует, что у торца и вблизи торца полосы (ленточного фундамента) напряжения σ_{zq} ниже аналогичных значений напряжений под полосой бесконечной длины и становятся практически равными последним на расстоянии $y/b = 2,5$ (рис. *h, k*). По формуле (7) у торца полосы примерно на таком же участке напряжения σ_{zq} также снижаются по сравнению с напряжениями под бесконечно длинной полосой.

Снижение напряжений у торцов полосы полубесконеч-

ной длины нами учитывалось при расчетах осадок ленточных фундаментов пристроек к существующим или строящимся зданиям.

Автор неоднократно наблюдал деформации вновь возводимых пристроек к тяжело нагруженным зданиям с наклоном от них, что связано не только с наличием уплотненной зоны в основаниях фундаментов этих зданий, но и со снижением напряжений в основаниях у торцов ленточных фундаментов пристроек. Для выравнивания напряжений σ_{zq} в основаниях фундаментов пристроек на участках примыкания к фундаментам существующих зданий целесообразно выполнять фундаменты пристроек трапециевидальной формы в плане с минимальной шириной $b/2$ при $y = 0$, возрастающей до ширины b на расстоянии $2,5 b$.

Из формулы (5) на основании принципа суперпозиции получено решение (Кушнер, Хаин, 1996), определяющее напряжения σ_{zq} в произвольной точке основания как в районе угла, так и под углом ленточного фундамента (рис. 1т). Это решение выражается также первым членом формулы (1), а коэффициент $k_5 = k_5$ определяется выражением

$$k_5 = \frac{1}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{m_1}{z} + \operatorname{arctg} \frac{C_1}{z} + \operatorname{arctg} \frac{m_1 C_1}{z M_1} + z \left[\frac{m_1}{m_1^2 + z^2} + \frac{C_1}{C_1^2 + z^2} + \frac{m_1 C_1 (m_1^2 + C_1^2 + 2z^2)}{(m_1^2 + z^2)(C_1^2 + z^2) M_1} \right] \right\} = \frac{1}{2\pi} [\Phi(m_1, C_1) - \Phi(m_2, C_2)], (8)$$

m_1 и m_2 - те же, что и в формуле (6)

$$C_1 = y + b/2; \quad C_2 = y; -b/2$$

$$M_1 = \sqrt{m_1^2 + C_1^2 + z^2} \quad M_2 = \sqrt{m_2^2 + C_2^2 + z^2};$$

b - ширина фундамента.

Формула (8) отвечает граничным условиям и условиям на бесконечности. При $x \rightarrow \infty, y = 0, z > 0$ или $x = 0, y \rightarrow \infty, z > 0$ [с учетом первого члена формулы (1)] приходим к решению Митчела-Колосова для оси симметрии полосы бесконечной длины. Если координата x или y стремится к бесконечности, а две остальные являются конечными, то при том же условии в квадратных скобках приходим полностью к решению Митчела-Колосова.

6. ШТАБЕЛИ СЫПУЧИХ И ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ И НАГРУЗКА НА ПОЛАХ ПО ГРУНТУ

Для определения напряжений σ_{zq} от штабелей материалов и нагрузки на полах по грунту могут использоваться решения для нагрузок:

- полубесконечной равномерной или распределенной по закону треугольника - формулы (6) и (7);
- равномерно распределенной по площади прямоугольного треугольника и многоугольника произвольного очертания (Рыбин, 1990);
- равномерно распределенной по площади прямоугольника - формула (9);
- равномерно распределенной по площади круга (Пособие, 1986);
- распределенной по площади круга в виде конуса или усеченного конуса (Рыбин, 1990);
- равномерно распределенной по площади кольца (Егоров, 1958).

7. ВЛИЯНИЕ СОСЕДНИХ ФУНДАМЕНТОВ. ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ФУНДАМЕНТ

В настоящее время влияние соседних фундаментов учитывается с помощью метода угловых точек. Приводим найденное нами по принципу суперпозиции решение, определяющее напряжения σ_{zq} в основании равномерно загруженного гибкого прямоугольного фундамента, облегчающее учет влияния соседних фундаментов.

Из формулы (6), определяющей распределение вертикальных нормальных напряжений σ_{zq} в основании равномерно загруженной полосы I полубесконечной протяженности, вычитается аналогичная формула, определяющая распределение напряжений σ_{zq} в основании так же загруженной подобной полосы II (рис. м).

Начало координат полосы I - $[x = 0, y = 0, z = 0]$, полосы II - $[x = 0, y = l, z = 0]$, где $y_1 = y - l$.

В результате несложных выкладок получаем новую конечную формулу для определения напряжений на произвольной вертикали как внутри, так и вне равномерно загруженного прямоугольника

$$\sigma_{zq} = q \frac{1}{2\pi} \left\{ \operatorname{arctg} \frac{m_1 y}{z R_{iy_1}} - \operatorname{arctg} \frac{m_1 (y-l)}{z R_{iy_1}} + \frac{m_1 z}{R_1} \left[\frac{R_1 + y}{m_1^2 + z^2} + \frac{y}{y^2 + z^2} \right] - \frac{m_1 z}{R_{iy_1}} \left[\frac{R_{iy_1} + y-l}{m_1^2 + z^2} + \frac{y-l}{(y-l)^2 + z^2} \right] \right\} = q \frac{1}{2\pi} [\psi(m_1) - \psi(m_2)], (9)$$

где l - длина прямоугольного фундамента, b - ширина фундамента; m_1 и R_1 принимаются из формулы (6);

$R_{iy_1} = \sqrt{m_1^2 + (y-l)^2 + z^2}$, а R_{ly_1} и R_{ly_2} соответствуют значениям m_1 и m_2 .

Как и предполагалось, исходя из решения для полосы бесконечной длины, анализ формулы (9) показал, что если в центре фундамента при $z = 0 \sigma_{zq} = q$, то на его продольной оси в торцах в точках $[x = 0, y = 0]$ и $[x = 0, y = l]$ при $z = 0 \sigma_{zq} = q/2$.

Подобная задача впервые была решена другим путем (Ляв, 1935), затем на основе предложенной академиком Галеркиным функции напряжений (Короткин, 1938), причем конечные формулы были получены в чрезвычайно сложном виде. Аналогичное решение с таким же сложным конечным результатом было получено в результате интегрирования выражения для напряжений от сосредоточенной силы по площади прямоугольника (Егоров, 1949). Сложность вычисления напряжений по этим формулам привела к необходимости использования метода угловых точек.

Формула (9) гораздо проще и может использоваться взамен нахождения напряжений по методу угловых точек. По этой формуле могут быть легко составлены таблицы.

Из формулы (9), используя координаты $[x = 0, y = l/2]$, легко переходим к формуле для определения напряжения σ_{zq} на вертикали, проходящей через центр фундамента. В безразмерных координатах $\zeta = 2z/b$ и $\eta = l/b$ она выражается в виде

$$\sigma_{zq} = q \frac{2}{\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{\eta}{\zeta \sqrt{\zeta^2 + \eta^2 + 1}} + \frac{\zeta \eta (2\zeta^2 + \eta^2 + 1)}{(1 + \zeta^2)(\eta^2 + \zeta^2)(\sqrt{\zeta^2 + \eta^2 + 1})} \right]. (10)$$

Пример. Найденные по формуле (9) напряжения σ_{zq} в точке с координатами в м $x = b/4 = 1, y = 3l/4 = 6, z = 2$ в основании загруженного равномерно нагрузкой интенсив-

ностью q прямоугольного фундамента размерами $b = 4$ м и $l = 8$ м равны $\sigma_{zp} = 0,669 q$.

Напряжения в той же точке, полученные на основании метода угловых точек, составляют $\sigma_{zp} = 0,678q$. Расхождение в 1,3% обусловлено несколько меньшей точностью вычислений с помощью таблиц по методу угловых точек.

8. ПРОЧИЕ НАГРУЗКИ

Воздействие нагрузок от движущегося транспорта учитывается действующими нормами проектирования городских мостов (трамвай, электрички, автомобильный транспорт). Определенные указания по учету подвижных нагрузок приведены в работе (Кушнер, 2008). Это относится и к работающим строительным кранам, где должна учитываться цикличность нагрузки. Что же касается других видов нагрузок, распределенных по площади, то они могут быть учтены на основе приведенных выше решений.

ВЫВОД

Правильный учет всех видов нагрузок на поверхности, воздействующих на основания проектируемых фундаментов, будет способствовать повышению точности прогноза осадок оснований, а также их неравномерности и недопущению деформаций и аварий сооружений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герсеванов Н.М., 1933. Общий метод теории упругости. Определение напряжений в грунте при заданной нагрузке на поверхности. Труды ВИОС. Сборник № 1. Москва – Ленинград, Госстройиздат. С. 16-38.
2. Егоров К.Е. 1949. Методы расчета конечных осадок фундаментов. Сборник трудов НИИОСП № 13. Москва, Машстройиздат. С 3-45.
3. Егоров К.Е., 1958. К вопросу расчета основания под фундаментом с подошвой кольцевой формы. Сборник трудов НИИОСП № 34. Москва, Госстройиздат. С. 34-57.
4. Короткин В.Г., 1938. Объемная задача теории упруго-изотропного полупространства. Сборник Гидропроекта № 4. Ленинград-Москва. ГОНТИ.
5. Кушнер С.Г., 1989. Деформация емкостного сооружения под воздействием нагрузки от планировочной насыпи. Основания, фундаменты и механика грунтов. № 4. С. 11-12.
6. Кушнер С.Г., 1990. Расчет осадок оснований зданий и сооружений. Киев. Будивэльник.
7. Кушнер С.Г., Резников О.М., 1993. Деформации путепровода на лессовых грунтах. Транспортное строительство, № 4, с. 20-23.
8. Кушнер С.Г., Хаин В.Я., 1996. Напряженное состояние оснований фундаментов от воздействия нагрузок на поверхности. Основания, фундаменты и механика грунтов. № 1, с. 5-9.
9. Кушнер С.Г., Хаин В.Я., 1999. Компоненты напряжений в основании полосы полубесконечной протяженности, загруженной вертикальной равномерной нагрузкой. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3. С. 2-5.
10. Кушнер С.Г., 2004. Строительство крупных сооружений на сжимаемых основаниях. Труды международной геотехнической конференции, Алматы, с. 308-311.
11. Кушнер С. Г., 2008. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. Запорожье, ООО ИПО Запорожье.
12. Ляв А. 1935. Математическая теория упругости. Москва-Ленинград, ОНТИ.
13. Пособие по проектированию зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). Москва, Стройиздат. 1986.
14. Рыбин В.С., Захарченко, 1990. Проектирование фундаментов реконструируемых зданий. Москва, Стройиздат.