

**ХОРУНЖИЙ ВАДИМ ИВАНОВИЧ**

Кандидат технических наук, инженер-строитель в Государственном предприятии "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций".

Основные направления научной деятельности: проектирование жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений; натурные исследования зданий на подрабатываемых территориях; разработка нормативных документов по проектированию зданий в сложных условиях строительства (здания серий 179, 87, 96, К-134, Пластбау, здания из монолитного железобетона и др.); обследования и оценка технического состояния поврежденных конструкций и зданий; разработка рекомендаций и проектной документации по усилению конструкций реконструируемых зданий.

Автор более 70 печатных работ.

E-mail: adm-inst@ndibk.kiev.ua

УДК 624.154

**АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА БЛЮМА-ЛОМЕЙЕРА В РАСЧЕТАХ ГИБКИХ ПОДПОРНЫХ СТЕНОК С АНКЕРАМИ**

*Ключевые слова: подпорные стенки, анкера, расчет.*

*Классический метод расчетов гибких подпорных стенок, выполняемых графически (метод Блюма-Ломейера), представлен в статье в аналитическом виде. Полученные формулы позволяют использовать программу Excel для определения усилий и перемещений в сечениях стенки и получать результаты расчетов в виде таблиц и графиков. Приведен пример расчета.*

*Класичний метод розрахунків гнучких підпірних стінок, виконаних графічно (метод Блюма-Ломейера), представлений у статті в аналітичному виді. Отримані формули дозволяють використовувати програму Excel для визначення зусиль і переміщень у перетинах стінки й одержувати результати розрахунків у вигляді таблиць і графіків. Наведений приклад розрахунків.*

*The classical method of calculations of the flexible breast walls which are carried out graphically (Blum-Lomejera method), is presented in article in an analytical sort. The received formulas allow to use program Excel for definition of efforts and movings in sectional views of a wall and to receive results of calculations in the form of tables and schedules. The calculation example is resulted.*

Метод расчета гибких подпорных стенок с анкерами, разработанный Блюмом-Ломейером в 1930 г., нашел широкое применение в практике проектирования и в научных исследованиях при анализе многочисленных опытов в лабораторных и натуральных условиях, выполненных с целью уточнения и повышения надежности результатов расчетов [1-9]. Во многих странах возведены сотни сооружений с подпорными стенками (в ограждениях котлованов и дорожных насыпей, в конструкциях причалов, береговых устоев мостов и др.), расчеты которых выполнялись по методу Блюма-Ломейера.

Расчеты по рассматриваемому методу выполняются графически с учетом теорем Сен-Венана и Мора, в соответствии с которыми прогиб сечения балки от заданных нагрузок принимается равным изгибающему моменту, а угол поворота - поперечной силе в том же сечении от фиктивной нагрузки. В качестве фиктивной нагрузки принимаются эпюры изгибающих моментов с численными значениями, деленными на жесткость балки. Расчетная схема подпорной стенки (рис.1) базируется на предпосылке, что заглубленная ее часть полностью закреплена в грунтовой массе. В уровне условного заземления ( $z=l$ ) угол поворота ( $\psi_l$ ), смещение ( $u_l$ ), а также изгибающий момент ( $M_l$ ) принимаются равными нулю. Пассивное сопротивление грунта за стенкой и у ее нижнего конца заменяется сосредоточенной силой  $B$ , приложенной на расстоянии  $0,2X$  выше этого конца. Полная высота заглубленной части стенки принимается  $h = 1.2 X$ .

Решение рассматриваемой задачи по классическому методу Блюма-Ломейера включает графическое построение эпюры моментов и упругой линии стенки. Неизвестная величина  $X$  определяется методом после-



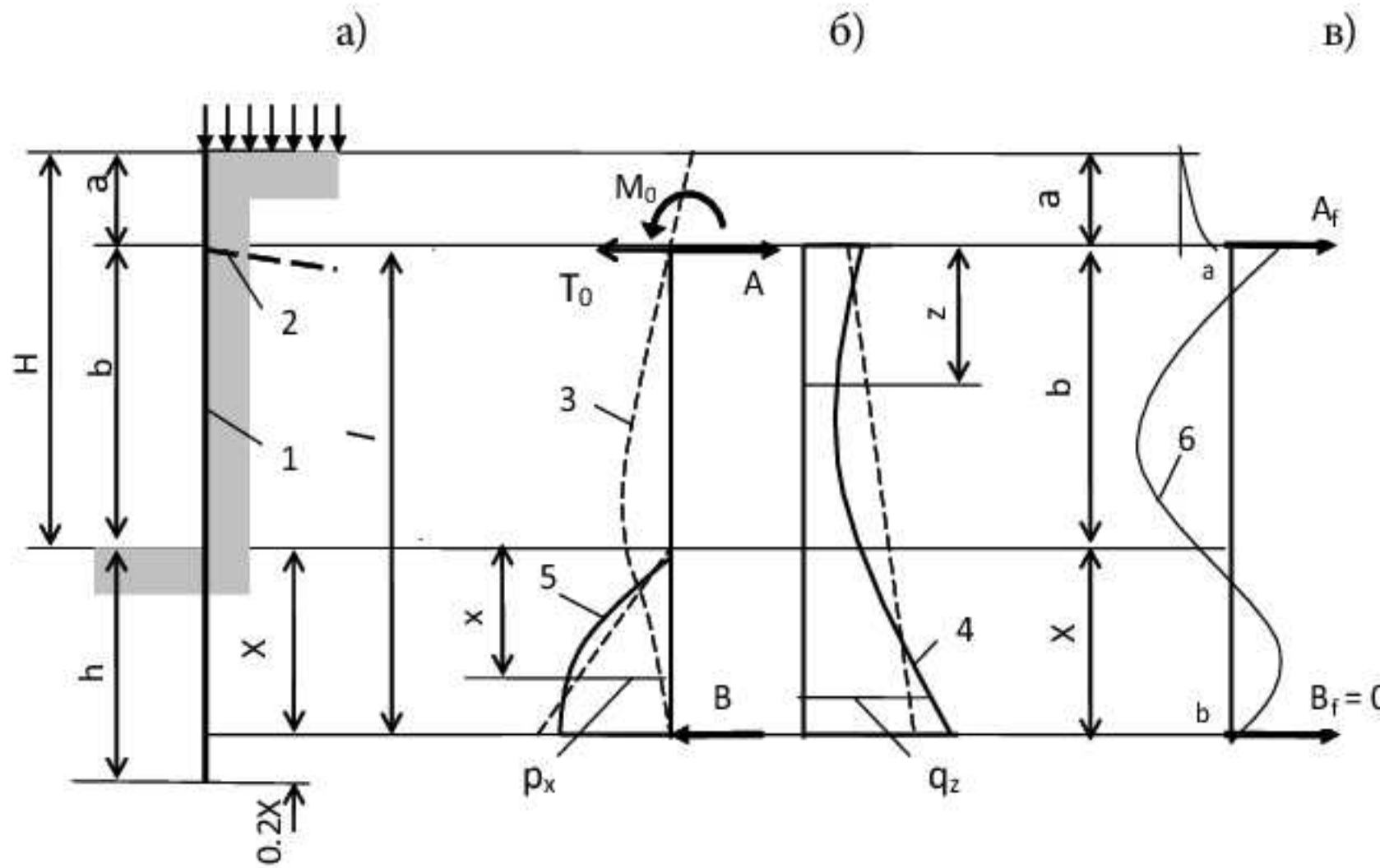


Рис. 1. К расчету гибкой подпорной стенки с анкерами. а - общая схема подпорной стенки, б - расчетная схема, в - расчетная схема с фиктивной нагрузкой от эпоры моментов, 1 - подпорная стенка, 2 - анкер, 3 - изогнутая ось стенки, 4 - эпюра активной нагрузки, 5 - эпюра пассивной нагрузки, 6 - эпюра моментов.

довательных приближений. Окончательное построение упругой линии должно отвечать указанным выше условиям на концах стенки. Этот метод расчета нагляден, но весьма трудоемок.

В данной статье решение рассматриваемой задачи представлено в аналитическом виде, что позволяет математические формулы записать в ячейки таблицы Excel стандартной программы компьютера и после введения исходных данных в течении секунд получать результаты расчета в виде таблиц и графиков.

В рассматриваемых расчетных схемах (рис.1) приняты следующие обозначения:

$M_0, T_0$  - момент и поперечная сила в месте крепления анкера от консольной части стенки;

$A$  - реакция в верхней опоре от грунтовых нагрузок, расположенных ниже опоры;

$B$  - равнодействующая пассивных давлений в сечении  $z=l$  ( $x=X$ ), направленная в сторону котлована;

$q_z, p_x$  - активное и пассивное распределенные давления грунта, эпюры которых в общем случае выражаются многочленами  $n$ -й степени.

Работа подпорной стенки рассматривается в условиях плоской деформации. Поэтому расчет выполняется для полосы шириной 1 м. Горизонтальная составляющая усилия в анкере определяется по формуле  $A_a = (A+T_0)c$ , где  $c$  - расстояние между анкерами.

В простейших случаях при однородном грунтовом массиве эпюра активных давлений принимается трапецевидной, а пассивных давлений - треугольной. Интегралы от функций указанных эпюр, которые используются в формулах, определяющих перемещения и усилия в сечениях стенки, представлены в таблице 1. Для краткости введено следующее обозначение повторных интегралов:

$$\int_0^x \int_0^x \dots \int_0^x q_z dz^n = \int_0^x dz \int_0^x dz \dots \int_0^x q_z dz.$$

В таблице принято  $t_a = \lambda_a \gamma$ ,  $t_p = K \lambda_p \gamma$ ,  $q = q_0 + t_a a$ , где  $\gamma$  - удельный вес грунта,  $\lambda_a, \lambda_p$  - коэффициенты активного и

пассивного давлений,  $K$  - коэффициент увеличения пассивного давления, принимаемый в зависимости от угла внутреннего трения грунта [1],  $q_0$  - распределенная нагрузка на поверхности грунта.

В соответствии с принятыми расчетными схемами (рис.1) выведем формулы для определения усилий и перемещений в сечениях стенки:

**опорная реакция в сечении  $z = l$**

$$A = [M_0 + T_0 l + q_z dz^2 - \int_0^x \int_0^x p_x dx^2] / (b + X) / l; \quad (1)$$

**пассивный отпор грунта в сечении  $z = l$**

$$B = \int_0^l q_z dz - \int_0^x p_x dx - A; \quad (2)$$

**поперечные силы и моменты в сечениях  $0 \leq z \leq b$**

$$T_z = A - \int_0^z q_z dz; \quad (3)$$

$$M_z = Az - M_0 - \int_0^z \int_0^z q_z dz^2; \quad (4)$$

**поперечные силы и моменты в сечениях:  $b \leq z \leq l$**

$$T_x = T_z + \int_b^{z-b} p_z dz; \quad (5)$$

$$M_x = M_z + \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^2 \quad (6)$$

Уравнения (1)-(6) содержат неизвестную величину  $X$ , для определения которой рассматривается балка с шарнирными опорами, нагруженная фиктивной нагрузкой в виде эпюры моментов (рис.1в). По условиям задачи угол поворота оси стенки на нижней опоре равен нулю. Следовательно фиктивная реакция нижней опоры также равна 0, а фиктивная реакция верхней опоры равна площади эпюры моментов

$$EI A_f = Al^2/2 - M_0 l - \int_0^l \int_0^l \int_0^l q_z dz^3 + \int_0^x \int_0^x \int_0^x p_x dx^3. \quad (7)$$

Углы поворота и перемещения в сечении  $0 \leq z \leq b$

$$EI \Psi_z = A_f z - Az^2/2 + M_0 z - \int_0^z \int_0^z \int_0^z q_z dz^3; \quad (8)$$

Таблица 1

Интегралы от эпюр грунтовых давлений

при трапецевидной эпюре	при треугольной эпюре
$q_z = q + t_a z,$	$p_z = t_p (z - b),$
$\int_0^z q_z dz = qz + t_a z^2 / 2,$	$\int_b^{z-b} p_z dz = t_p (z - b)^2 / 2,$
$\int_0^x \int_0^x p_z dx^2 = qz / 2 + t_a z^3 / 6,$	$\int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^2 = t_p (z - b)^3 / 6,$
$\int_0^z \int_0^z \int_0^z q_z dz^3 = qz^3 / 6 + t_a z^4 / 24,$	$\int_b^{z-b} \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^3 = t_p (z - b)^4 / 24,$
$\int_0^z \int_0^z \int_0^z \int_0^z q_z dz^4 = qz^4 / 24 + t_a z^5 / 120.$	$\int_b^{z-b} \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^4 = t_p (z - b)^5 / 120.$



$$EI u_z = A_f z^2 / 2 - Az^3 / 6 + M_0 z^2 + \int_0^z \int_0^z \int_0^z q_z dz^4. \quad (9)$$

Углы поворота и перемещения в сечениях  $b \leq z \leq (b+X)$

$$EI \Psi_z = A_f z - Az^2 / 2 + M_0 z - \int_0^z \int_0^z q_z dz^3 + \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^3 \quad (10)$$

$$EI u_z = A_f z^2 / 2 - Az^3 / 6 + M_0 z^2 + \int_0^z \int_0^z \int_0^z q_z dz^4 + \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} \int_b^{z-b} p_z dz^4 \quad (11)$$

Неизвестная величина X определяется из уравнения (11) при  $u_l = 0$  в сечении нижней опоры

$$A_f l^2 / 2 - Al^3 / 6 + M_0 l^2 + \int_0^l \int_0^l \int_0^l q_z dz^4 + \int_0^x \int_0^x \int_0^x p_x dx^3 = 0. \quad (12)$$

Если исключить условие  $\Psi_l = 0$  (угол наклона изогнутой оси балки в сечении  $z=l$ ), принятое в задаче Блюма-Ломейера, то при уменьшении глубины заглубления стенки происходят следующие изменения:

- увеличивается угол наклона изогнутой оси в заглубленной части стенки,
- увеличивается усилие в анкере, а также максимальный момент в незаглубленной части ;
- уменьшается момент защемления в заглубленной части стенки,
- уменьшается пассивный отпор грунта В и при достижении его нулевого значения подпорная стенка работает по схеме Якоби (свободное опирание, обеспечивающее статического равновесие); в этом случае горизонтальная составляющая усилия в анкере определяется по формуле:

$$A^* = \int_0^l q_z dz - \int_0^x p_x dx + T_0. \quad (13)$$

Уравнение для определения величины заглубления стенки, работающей по схеме Якоби, определяется из условия на нижнем конце стенки  $M_l = 0$ :

$$M_0 - A^*(b+h) + \int_0^l \int_0^l q_z dz - \int_0^x \int_0^x p_x dx = 0 \quad (14)$$

Уравнения (1)-(14) составлены в обобщенном компактном виде, что упрощает их запись в таблицу Excel и дает наглядное представление о сущности силовых воздействий и о процессе вычислений. Эти уравнения позволяют использовать данные выполненных экспериментальных исследований, в результате которых установлены зависимости грунтовых давлений от характеристик грунтов и перемещений подпорной стенки [1-6]. Указанные эмпирические зависимости как правило представлены в аналитической форме, что позволяет их интегрировать и исключить процесс замены распределенных грунтовых нагрузок сосредоточенными силами.

При трапециевидной эпюре активной и треугольной эпюре пассивной нагрузках, определяемых по Кулону, интегралы функций в уравнениях (1) - (12) представлены в таблице 1.

При указанных эпюрах грунтовых давлений уравнение (12), содержащее неизвестную величину X, имеет вид:

$$q(b+X)^3 / 24 + t_a(b+X)^4 / 45 + t_p X^4 [15 - 20(b+X) / b - 3b / (b+X)] / 360 - M_0(b+X) / 6 = 0 \quad (15)$$

В качестве примера выполнен расчет подпорной стенки с одноярусным расположением анкеров по схеме Блюма-Ломейера при следующих данных:  $H=8$ м,  $b=6$ м,  $\gamma=19$ кН/м<sup>3</sup>,  $\varphi=300$ . Результатами расчета являются:  $X=3.39$ м,  $h=1.2$  X=4.07м,  $A=128.54$  кН,  $B=285.2$  кН, а также эпюры моментов, поперечных сил, углов поворота и прогибов изогнутой оси стенки (рис 2).

Подпорные стенки, рассчитываемые по схеме Блюма-Ломейера должны отвечать следующему критерию [1]:

$$d_a / X \leq 0.06, \text{ где } d_a = [(12J / (D+s))]^{1.5} \quad (16)$$

$d_a$  - приведенная ширина стенки; X - высота заглубленной части; J и D - момент инерции и диаметр сваи или ширина стенки; s - зазор между соседними сваями.

При  $d_a/X \geq 0.06$  считается, что стенка имеет повышенную жесткость и ее следует рассчитывать по схеме Э.К. Якоби .

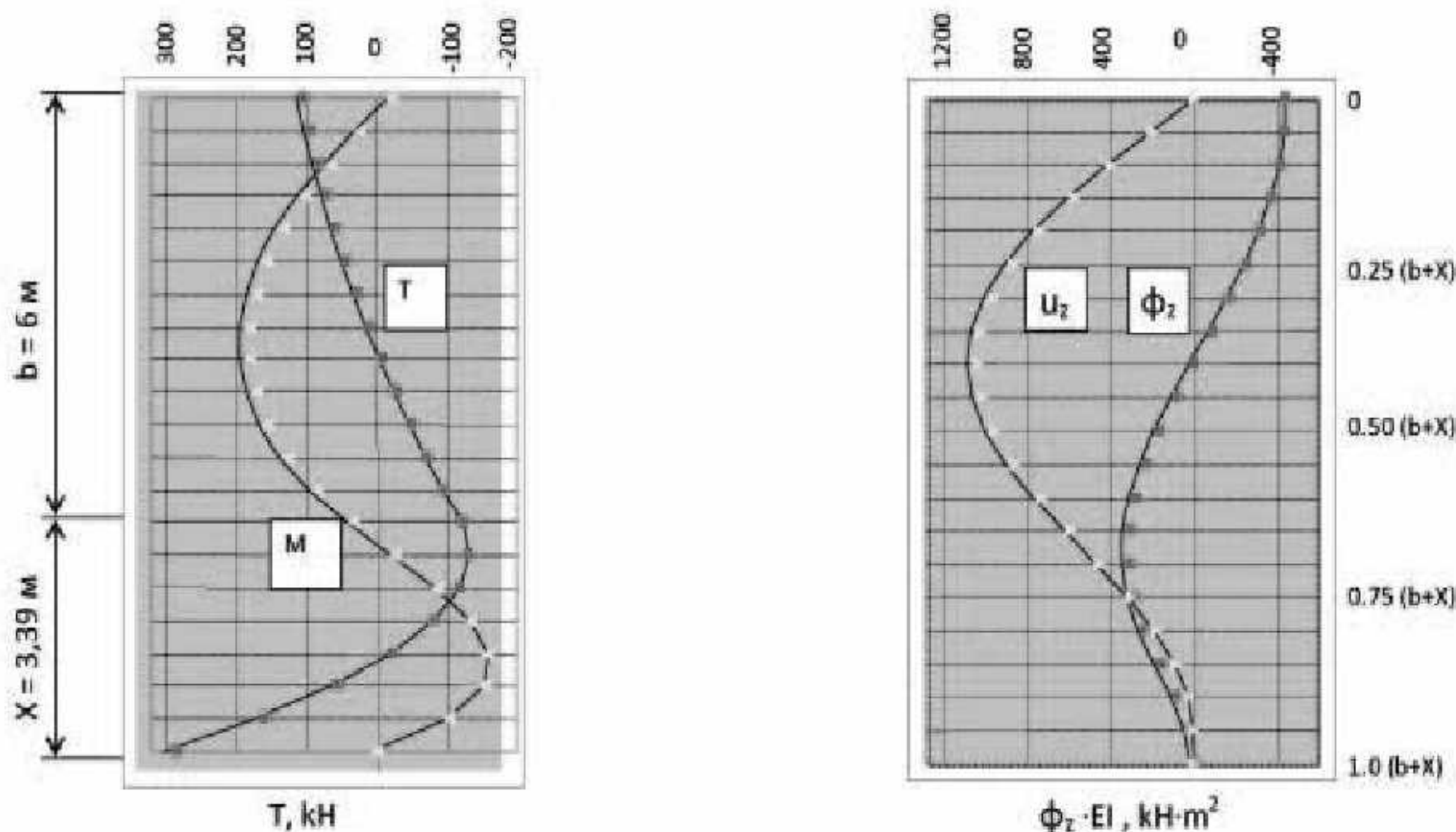


Рис. 2. Эпюры моментов (M), поперечных сил (T), прогибов ( $u_z$ ) и углов поворота ( $\phi_z$ ) изогнутой оси подпорной стенки



Предложенный метод решения задачи Блюма-Ломейера в аналитической форме применим и для расчетов гибких подпорных стенок с многоярусным расположением анкеров. При двухярусном расположении рассматривается задача с двумя неизвестными  $X$  и  $M_1$ , где  $M_1$  - момент в месте крепления нижнего яруса анкеров. Указанные неизвестные также определяются из уравнения, выражающего заданные условия на нижнем конце стенки ( $u_1=0$ ,  $\psi_1=0$ ), с помощью процедур **Сервис > Надстройка > Поиск решения** в программе **Excel**.

В настоящее время классический метод расчета по схеме Блюма-Ломейера вытесняют новые методы в более строгой постановке, основанные на гипотезах коэффициента постели, упругого полупространства, предельного

равновесия и др. Получение достоверных результатов по разным методам требует соответствующих знаний и интуиции проектировщика вследствие недостаточной определенности многих исходных данных. Оптимальные компоновочные и конструктивные решения подпорных стенок получают с применением нескольких методов расчета. При этом расчеты по схеме Блюма-Ломейера сохраняют практическую ценность в связи с использованием уточняющих коэффициентов, установленных на основании многочисленных лабораторных и натурных исследований, результаты которых сопоставлялись с расчетами по Блюму-Ломейеру [1 - 9]. Эти коэффициенты могут быть уточнены и представлены в виде коэффициентов надежности и условий работы в современных методах расчетов.

### ABSTRACT

**Sokolov V.A., Pogrebnyk A.I. Some geotechnical aspects deconsolidation soil- the bases at opening of deep foundation ditches** //The world of geotekhnik.- 2010.- №2.- P.4-11.

In article has reflected the problems which have arisen at opening of the deep foundation ditch, connected with reconsolidation grounds in his sole. The theoretical substantiation of a problem has given and the term «reconsolidation grounds» is offered. The program studying of the phenomenon reconsolidation is offered

**Gran'ko E.V. Model wringing out lasted wetted loessial soils** //The world of geotekhnik.- 2010.- №2.- P.12-17.

The estimation of the stressed-deformed state of wetted of bases of loessial during their protracted exploitation and development of recommendation from the engineering methods of their calculation, for the increase of loading on basis at the reconstruction of building, in particular to building on, without the additional strengthening of bases and foundations.

**Shapoval A.V. Variation method of boundary elements** //The world of geotekhnik.- 2010.- №2.- P.18-20.

Updating of a method of the boundary elements is offered, allowing with other things being equal to raise accuracy of approximation contact эпор on a sole of the bases. The basic difference of an offered variant of a method of boundary elements from classical is approximation possibility эпор

pressure within each of boundary polynoms with use n degrees or other continuous function of co-ordinates.

**Gerebyt'ev A.V. Use of mathematical mapping out of experiment for the multifactorial account of properties of priming coats at designing and building of soil constructions** //The world of geotekhnik.- 2010.- №2.- P.21-28.

Possibilities of use of methods of mapping out of experiment are considered at designing and building of soil water retaining constructions. Are offered a new way of definition of standard and settlement characteristics of priming coats in banks and a method of the geotechnical supervisory control.

**Horungiy V.I. Automation of a method of Blum-Lomejera in calculations of flexible breast walls with land ties** //The world of geotekhnik.- 2010.- №2.- P.29-32.

The classical method of calculations of the flexible breast walls which are carried out graphically (Blum-Lomejera method), is presented in article in an analytical sort. The received formulas allow to use program Ekcel for definition of efforts and movings in sectional views of a wall and to receive results of calculations in the form of tables and schedules. The calculation example is resulted.