

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБЪЕМА КОТЛОВАНА ПОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

В. И. Селезнев, кандидат технических наук
И. Ч. Казмирук, кандидат технических наук
А. А. Левицкий, студент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

Проанализирована относительная погрешность способов вычисления геометрического объема котлована по известным формулам и предложен не применявшийся ранее способ расчета объема котлована по координатам его вершин (автор – А. А. Левицкий). Удельный вес земляных работ в гидротехническом строительстве составляет более 20 % по трудоемкости и около 15 % по стоимости, поэтому важным является определение точного геометрического объема. За истинное значение при определении относительной погрешности расчетных формул был принят объем котлована, рассчитанный с помощью программы САПР AutoCAD.

Ключевые слова: земляные работы, объем котлована, относительная погрешность, растительный грунт, формула Симпсона.

Abstract

V. I. Seleznev, I. Ch. Kazmiruk, A. A. Levitsky

COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING THE VOLUME OF A DITCH FOR HYDROTECHNICAL STRUCTURES

The relative error of the methods for calculating the geometric volume of the ditch according to the known formulas is analyzed and an algorithm for calculating the pit by the coordinates of its vertices is proposed (author – A. A. Levitsky). The proportion of earthworks in hydrotechnical engineering is more than 20 % in terms of labor intensity and about 15 % in terms of cost; therefore, it is important to determine the exact geometric volume. The volume of the pit, calculated using the CAD program AutoCAD, was taken as the true value in determining the relative error of the calculation formulas.

Keywords: earthworks, ditch volume, relative error, vegetative soil, Simpson's formula.

Введение

При строительстве гидротехнических сооружений (ГТС) земляные работы выполняются в сложных топографических, геологических, гидрогеологических условиях. Земляные работы по устройству котлована включают снятие растительного слоя, разработку котлована, перемещение грунта в кавальеры, подчистку дна, обратную засыпку пазух и уплотнение. При строительстве крупных ГТС отклонения результата расчета объема земляных работ на стадии проекта организации строительства (ПОС) от фактических объемов могут быть весьма значительными. Помимо определения непосредственно объемов под котлован, выполняют также расчеты объема въездных траншей, уширения для разворота транспорта и другие, без которых невозможно строительство ГТС.

Объемы земляных работ на стадии проектирования определяют по расчетным формулам и чертежам, а при устройстве котлована – по фактическому объему разработанного грунта. Подсчет объема котлована можно свести к расчету объемов различных геометрических фигур, определяющих форму будущего земляного сооружения, объемы которых затем суммируются, но этот процесс более трудоемкий. Но при сложных формах поперечного сечения котлована (полигональное поперечное сечение, наличие берм на откосах, асимметричность котлована из-за стесненных условий городских территорий) разбивка на ряд более простых геометрических тел может стать предпочтительным вариантом нахождения общего геометрического объема. Полученные значе-

ния используют для составления баланса земляных масс. Точность в определении объема необходима для подбора машин и механизмов, определения сметной стоимости земляных работ, величины оплаты труда рабочих, инженерно-технических работников и проч.

Исходя из данных инженерных изысканий определяется толщина растительного слоя грунта и группа грунта по сложности разработки. От вида и состояния грунтов (мерзлые, водонасыщенные и т. п.) в месте устройства котлована зависят методы производства работ, которые обусловлены сложностью и трудоемкостью процесса разработки.

Результаты исследования и их обсуждение

Временные выемки и насыпи, получаемые при разработке и перемещении грунта, являются земляными сооружениями. Их геометрические размеры в значительной степени зависят от рельефа местности. Котлован по завершении работ нулевого цикла ГТС засыпается.

Следует учитывать, что расчет объемов земляных работ производят при плотности есте-

Котлован на предварительно не спланированной территории представляет собой сложную геометрическую фигуру. По своей форме он близок к опрокинутой усеченной четырехгранной пирамиде и правильному призматиду с боковыми сторонами в виде трапеций. Обе эти фигуры имеют параллельные горизонтальные основания – верхнее и нижнее. Верхняя часть котлована под ГТС представляет собой наклонную поверхность, не параллельную дну котлована.

Студентом и сотрудниками БНТУ проведен сравнительный анализ расчетных формул и определена их точность.

ственного сложения грунтов (геометрический объем), а при отвозе грунта самосвалами, проектировании отвалов и кавальеров учитывается его первоначальное увеличение на 10–30 % после разработки (строительный объем), которое зависит от вида грунта (табл. 1). Остаточное разрыхление учитывается при нахождении объема подчистки дна котлована.

Таблица 1. Увеличение объема грунта после разработки [1]

Наименование грунта	Первоначальное увеличение объема грунта после разработки, %	Остаточное разрыхление грунта, %
1. Глина ломовая	28–32	6–9
2. Глина мягкая жирная	24–30	4–7
3. Гравийно-галечные грунты	16–20	5–8
4. Лесс мягкий	18–24	3–6
5. Лесс твердый	24–30	4–7
6. Песок	10–15	2–5
7. Растительный грунт	20–25	3–4
8. Суглинок легкий и лессовидный	18–24	3–6
9. Суглинок тяжелый	24–30	5–8
10. Супесь	12–17	3–5
11. Торф	24–30	8–10

Размеры котлована устанавливают исходя из общих размеров сооружения в плане, глубины заложения фундамента, крутизны откосов, а также принятых способов выполнения основных производственных процессов: монтажа сборных или устройство монолитных железобетонных конструкций; доставки

и раскладки конструкций в монтажной зоне, установки опалубки, лесов и подмостей; движения транспорта и т. п. При этом важно учесть схему возведения будущего сооружения, определяющую схему движения кранов и других машин при монтаже сборных или возведении монолитных сооружений.

Схема I (кольцевая) – ведущая, и другие машины, работающие с ней в комплекте (например, кран и транспортные средства), при возведении сооружения перемещаются по берме котлована, не заезжая на его дно. Схема II – механизмы движутся по дну котлована за пределами сооружения по его периметру. Схема III – механизмы при строительстве сооружения перемещаются непосредственно по днищу бетонного сооружения. Схема IV предусматривает монтаж сооружения одновременно двумя параллельно работающими кранами, при котором конструкции крайних стен и примыкающего пролета сооружения монтируются первым краном с передвижением его и транспортных средств по берме котлована, а конструкции внутри сооружения – вторым краном, движущимся по днищу сооружения. Размеры котлована в плане зависят от вы-

бранной схемы возведения сооружения, при этом они должны быть достаточными для размещения сооружений, проезда техники по дну выемки, а также раскладки конструкций по фронту работ [2].

Для безопасного ведения работ в котловане требуется установить крутизну откосов выемки, зависящей от глубины котлована и вида грунта [3]. Откосы могут быть вертикальные (с креплением) или наклонные (без крепления). Крутизна откоса показывает соотношение сторон при прямом угле условного треугольника, где высота прямоугольного треугольника (первый катет) принимается равной 1, а прилегающая (горизонтальная) сторона треугольника (второй катет) – mh , то есть крутизна откоса – $1 : m$ (табл. 2). Коэффициент заложения откоса – горизонтальная проекция наклонной линии – mh , где h – высота котлована (рис. 1) [4].

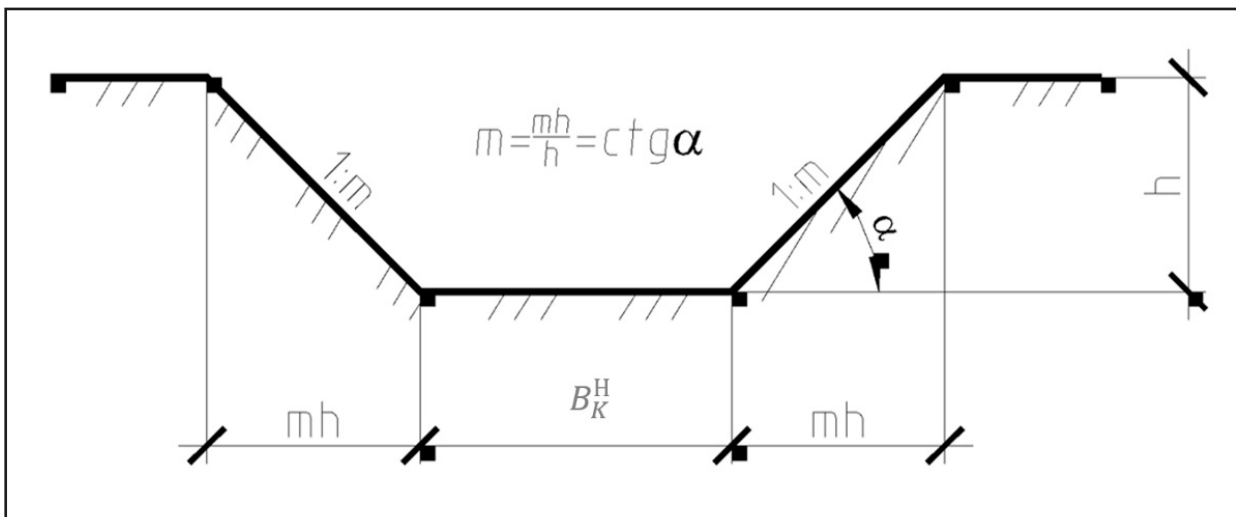


Рис. 1. Схема к определению крутизны откосов котлована

Таблица 2. Крутизна откосов котлованов в необводненных грунтах [4]

Грунты	Наибольшая крутизна откоса (1 : m) при глубине выемки, м (до)						
	1,5	3	5	6	8	10	14
Насыпные неуплотненные	1 : 0,67	1 : 1	1 : 1,25	1 : 1,25	1 : 1,5	1 : 1,75	1 : 2
Песчаные и гравелистые	1 : 0,5	1 : 1	1 : 1	1 : 1,25	1 : 1,5	1 : 1,75	1 : 2
Супесь	1 : 0,25	1 : 0,67	1 : 0,85	1 : 1	1 : 1,25	1 : 1,5	1 : 1,75
Суглинок	1 : 0	1 : 0,50	1 : 0,75	1 : 0,85	1 : 1	1 : 1,25	1 : 1,5
Тяжелый суглинок, глина	1 : 0	1 : 0,25	1 : 0,5	1 : 0,75	1 : 1	1 : 1,25	1 : 1,5

Расчет объема котлована по классическим формулам

Котлованы под ответственные сооружения (такие как, например, атомная электростанция) устраивают на заранее спланированной территории, придавая площадке строительства одну высотную отметку. Объем котлована в таком случае легко рассчитать по существующим формулам объемных геометрических фигур, поскольку он имеет форму правильного призматоида с боковыми сторонами в виде трапеций. В общем случае при разработке котлована планировка территории не выполняется, а снимается только растительный слой. Цель этого мероприятия двояка: с одной стороны, растительный слой богат гумусом (органика) и требуется его сохранение в экологических целях, поскольку образование гумуса в почве – длительный и до конца не изученный процесс; с другой стороны, растительные остатки в плодородном слое почвы, перегнивая, уменьшают свой объем, следовательно, осадка основания фундамента будет неравномерной и он может дать трещины.

При устройстве котлованов под гидротехнические сооружения планировка поверхности чаще всего не производится, поэтому форма котлована не соответствует фигуре призматоида, поскольку его дно устраивают не параллельно поверхности земли, а горизонтально, придавая незначительный уклон для сбора и отвода ливневых и талых вод. Рассчитывая такой котлован по общепринятым математическим формулам (формуле Симпсона для нахождения объема призматоида, формуле объема опрокинутой усеченной четырехгранной пирамиды или др.), получаем погрешность в определении объема котлована, которая обусловлена в том числе и непараллельностью оснований.

Погрешность расчетных формул завышает объемы земляных работ по сравнению с реальными. При строительстве крупных сооружений эта разница может быть весьма существенна. На основе определения геометрического объема котлована рассчитывается количество строительной техники для его разработки: подбор экскаваторов с автотранспортом к ним для отвоза грунта. Объем кузова автотранспорта принимают с учетом увеличения объема грунта при разработке (см. табл. 1).

Цель работы – определить относительную погрешность формул для расчета геометрического объема котлована. За истинный был принят объем, рассчитанный в программе *Autodesk AutoCAD*. Поскольку *AutoCAD* является специализированной программой и лицензионная его версия имеет значительную стоимость, то не все организации имеют возможность пользоваться ею и определять объемы земляных работ с ее помощью. Кроме того, работа в данной программе подразумевает высокую квалификацию инженера-проектировщика. Геометрический объем котлована на неспланированной территории можно рассчитать по формулам с применением простейших средств вычисления и определить их относительную погрешность. Предложен новый алгоритм расчета, дающий абсолютно точный объем и нулевую относительную погрешность.

Для определения геометрических размеров котлована в зависимости от крутизны откоса рассчитывают параметры котлована по верху. Длина котлована по верху L_K^B определяется по формуле:

$$L_K^B = L_K^H + 2mH_K, \text{ м}, \quad (1)$$

где L_K^H – длина котлована по низу, м;
 m – коэффициент заложения откоса котлована (см. табл. 2);

H_K – глубина котлована, м.

Ширину котлована по верху B_K^B можно вычислить по следующей зависимости:

$$B_K^B = B_K^H + 2mH_K, \text{ м}, \quad (2)$$

где B_K^H – ширина котлована по низу, м.

Объем котлована $V_{\text{кот}}$ с откосами определяется по объему призматоида, который вычисляется по формуле Симпсона:

$$V_{\text{кот}} = \frac{H_K}{6} (F_1 + 4F_{\text{cp}} + F_2), \text{ м}^3, \quad (3)$$

где F_1 – площадь котлована по низу, м^2 ,
 вычисляемая по формуле $F_1 = L_K^H \cdot B_K^H$; (4)

F_2 – площадь котлована по верху, м^2 ,
 определяемая по формуле $F_2 = L_K^B \cdot B_K^B$; (5)
 соответственно F_{cp} – средняя площадь:

$$F_{\text{cp}} = \frac{F_1 + F_2}{2}. \quad (6)$$

Общий объем грунта разрабатываемого котлована $V_{\text{кот}}$ можно определить, рассчитав объем опрокинутой усеченной пирамиды:

$$V_{\text{кот}} = \frac{H_K}{3} (F_1 + \sqrt{F_1 F_2} + F_2). \quad (7)$$

Б. Ф. Белецким предложена формула расчета объема котлована [5, с. 289]:

$$V_{\text{кот}} = \frac{H_K}{6} (F_1 + F_2 + (B_K^H + B_K^B)(L_K^H + L_K^B)). \quad (8)$$

Объем правильной геометрической фигуры можно найти произведением площади поперечного сечения на длину средней линии в перпендикулярном сечении:

$$V_{\text{кот}} = (B_K^H + mH_K)H_K(L_K^H + mH_K). \quad (9)$$

Объем котлована получим умножением средней линии трапеции S (22) в сечении 1–1 (рис. 2) на сумму площадей трапеции и треугольника в сечении 2–2 (где H_p по рис. 4):

$$V_{\text{кот}} = \left[(B_K^H + mH_p)H_p + \frac{1}{2}(B_K^B + 2mH_p)h \right] \cdot S. \quad (10)$$

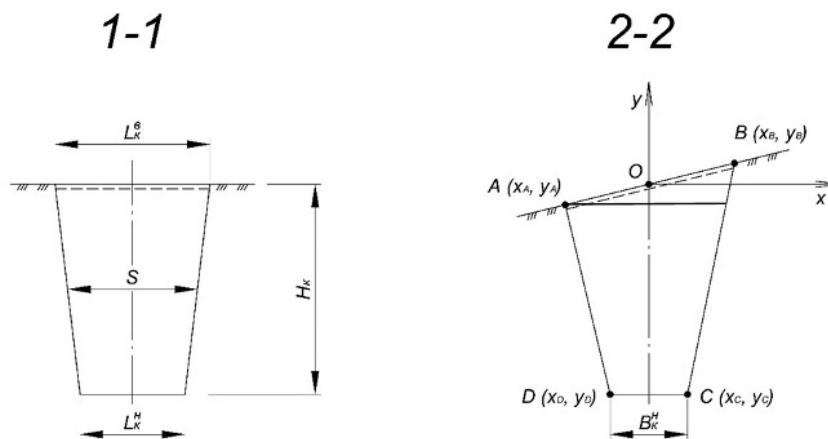


Рис. 2. Схема котлована к расчету его объема по координатам вершин

Для определения координат точек A и B прямые AB , BC и AD представляются уравнениями прямых с угловым коэффициентом, имеющих следующий вид:

$$y = kx + b. \quad (14)$$

С учетом того, что прямая AB проходит через начало системы координат, значение коэффициента b_{AB} будет равно нулю. Угловым коэффициентом этой прямой k_{AB} определяется на основании исходных данных и выбранного сечения как отношение разности отметок между выбранными точками по линии AB к расстоянию между этими точками по следующей зависимости:

$$k_{AB} = \frac{|H_1 - H_2|}{L_{1-2}}, \quad (15)$$

где H_1 и H_2 – отметки поверхности земли соответственно первой и второй точек по линии сечения, м;

L_{1-2} – расстояние между выбранными точками по линии сечения, м.

Значение коэффициента k_{AB} будет положительным при наклоне линии AB вправо и отрицательным при наклоне влево.

В соответствии с заданными условиями угловые коэффициенты прямых AD и BC будут равны между собой по модулю и обратно пропорциональны коэффициенту заложения

Расчет объема котлована по координатам его вершин (автор – А. А. Левицкий)

Суть данного алгоритма расчета заключается в определении площадей сечений котлована при нахождении его объема с использованием координат вершин в декартовой системе координат.

На основании исходных данных выбирается сечение, представленное обычно в виде четырехугольника (рис. 2), площадь которого необходимо найти. Далее задается новая декартова система координат с центром в точке O (сечение 2–2, рис. 2). При таком ее расположении координаты точек C и D находятся в соответствии с заданными параметрами котлована по следующим зависимостям:

$$y_D = y_C = -H_K, \quad (11)$$

$$x_C = \frac{B_K^H}{2}, \quad (12)$$

$$x_D = -\frac{B_K^H}{2}. \quad (13)$$

откосов котлована. С учетом их наклона к оси абсцисс в соответствии с рис. 2 угловые коэффициенты этих прямых будут равны:

$$k_{BC} = \frac{1}{m}, \quad (16)$$

$$k_{AD} = -\frac{1}{m}, \quad (17)$$

где m – коэффициент заложения откосов котлована.

Коэффициент b_{AD} прямой AD в таком случае будет равен коэффициенту b_{BC} прямой BC , который можно определить по формуле:

$$b_{AD} = b_{BC} = -\left(H_{\kappa} + \frac{B_{\kappa}^H}{2m}\right). \quad (18)$$

Найдя все значения коэффициентов уравнений прямых линий AB , BC и AD , определим координаты точек их пересечения, x_A, y_A, x_B, y_B , решая следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} y_A = k_{AB} \cdot x_A \\ y_A = k_{AD} \cdot x_A + b_{AD} \end{cases}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} y_B = k_{AB} \cdot x_B \\ y_B = k_{BC} \cdot x_B + b_{BC} \end{cases}. \quad (20)$$

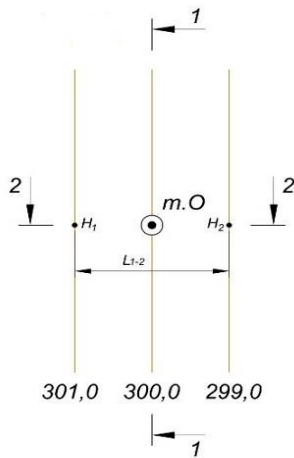


Рис. 3. Исходные данные к примеру расчета

На основании полученных результатов можно определить площадь сечения котлована, используя формулу Гаусса:

$$F = \frac{1}{2} |x_A y_B + x_B y_C + x_C y_D + x_D y_A - y_A x_B - y_B x_C - y_C x_D - y_D x_A|. \quad (21)$$

Для определения объема котлована полученную площадь поперечного сечения необходимо умножить на среднюю линию трапеции продольного сечения S (рис. 2), проходящего по горизонтали, которую можно определить по следующей зависимости:

$$S = L_{\kappa}^H + m \cdot H_{\kappa}. \quad (22)$$

Таким образом, объем котлована $V_{\text{кот}}$ можно найти по формуле:

$$V_{\text{кот}} = F \cdot S. \quad (23)$$

В качестве примера рассчитаем объем котлована по формулам (3, 7–10), а также по предложенному алгоритму (11–23) и определим погрешность расчета.

Исходные данные к примеру расчета приведены на рис. 3.

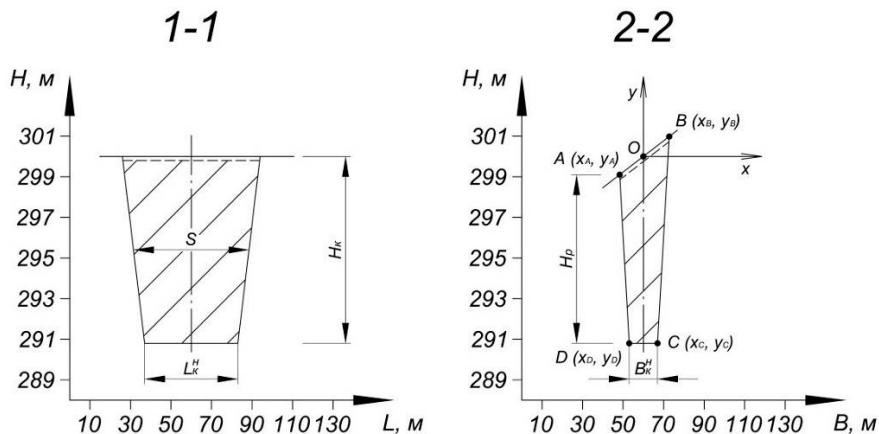


Рис. 4. Разрезы по котловану к примеру расчета (масштаб по оси H 1:100, по оси L 1:1000)

Согласно исходным данным (рис. 3) котлован в плане располагается между горизонталями 301,0 и 299,0 с центром в точке O . Ширина котлована по низу $B_K^H = 14$ м, длина по низу $L_K^H = 46$ м, глубина составляет $H_K = 9,2$ м. В соответствии с данными, полученными в результате бурения инженерно-геологической скважины (рис. 3 справа), грунт в месте расположения котлована представлен растительным слоем, толщина которого равна $t_p = 0,2$ м, и суглинком со вскрытой мощностью 10 м. Разрезы по котловану даны на рис. 4.

При заданных условиях коэффициент заложения откосов котлована принимается равным $m = 1,25$ (табл. 2).

Для нахождения объема снимаемого растительного слоя грунта необходимо в пер-

вую очередь определить длину линии $a = AB$ (рис. 5) по следующей формуле:

$$a = \sqrt{b^2 + h^2}, \quad (24)$$

где h – длина катета прямоугольного треугольника, определяемая разностью высотных отметок точек A и B по оси H ;

b – длина катета прямоугольного треугольника, определяемого по формуле

$$b = B_K^H + 2mH_p + mh, \quad (25)$$

где H_p – расстояние между точками A и D по оси H (или разница отметок высот точек A и D) (рис. 5).

Таким образом, объем снимаемого растительного слоя грунта $V_{p.r.}$ определится как

$$V_{p.r.} = a \cdot t_p \cdot L_K^B. \quad (26)$$

Результаты расчета объема котлована различными способами приведены в табл. 3.

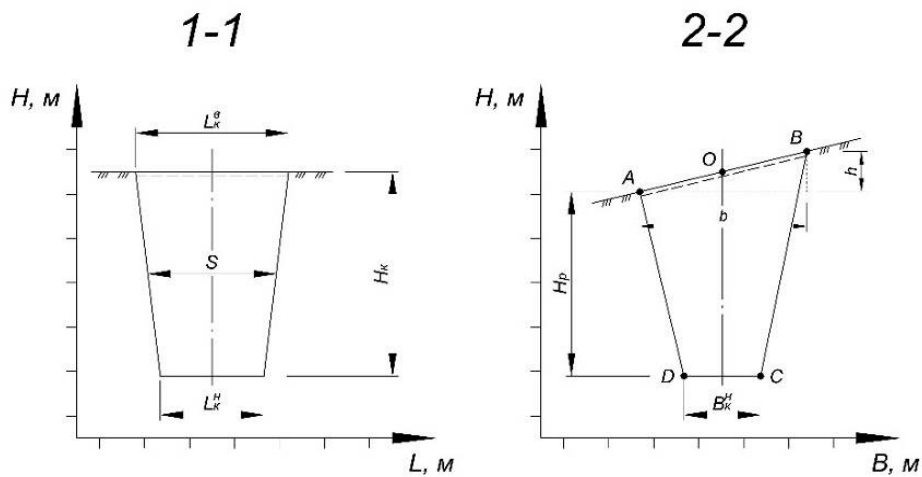


Рис. 5. Схема котлована к расчету объема растительного грунта

Таблица 3. Определение общего объема котлована и относительной погрешности расчетных формул

Способ определения объема котлована	Общий объем котлована, $V_{котт}, \text{ м}^3$	Относительная погрешность, %
С помощью САПР AutoCAD	13611,58	0,00
По формуле (3)	14706,20	8,04
По формуле (7)	13736,33	0,92
По формуле (8)	13895,07	2,08
По формуле (9)	13489,50	0,90
По формуле (10)	13571,83	0,29
По формулам (11–23)	13611,58	0,00

Выводы

Расчет по САПР *AutoCAD* основан на подсчете геометрического объема, который равен реальному объему вынутого грунта. Приняв данный объем за истинный, рассчитали относительную погрешность формул (табл. 3). Проанализировав результаты расчета, можно сделать вывод о высокой точности алгоритма расчета по координатам вершин котлована (автор – А. А. Левицкий). Данный алгоритм

дает нулевую относительную погрешность по формулам (11–23). Наибольшая погрешность в расчете объема котлована получена по формуле Симпсона (3), она составила 8 %. Завышенный объем (2,08 %) наблюдается также по формуле (8). Несущественная относительная погрешность выявлена при расчете по формулам (7), (9) и (10).

Библиографический список

1. Единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. ЕНиР. Сб. Е2. Земляные работы : утв. постановлением Госстроя СССР, Госкомтруда СССР и Секретариата ВЦСПС от 5 дек. 1986 г. № 43/512/29-50) (с изм. от 28 сент. 1989 г.; ред. от 18 дек. 1990 г.). – М. : Гос. строит. ком-т СССР, 1989. – Вып. 1. Механизированные и ручные земляные работы. – 193 с.
2. Селезнев, В. И. Строительство емкостных сооружений систем водоснабжения и водоотведения : метод. пособие по выполнению курсового проекта и раздела дипломного проекта по дисциплине «Техника и технология строительного-монтажных работ» для студентов спец-ти 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» / В. И. Селезнев, Г. А. Коревицкий. – Минск : БНТУ, 2010. – 134 с.
3. Правила по охране труда при выполнении строительных работ [Электронный ресурс] : утв. постановлением М-ва труда и соц. защиты Респ. Беларусь и М-ва архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 31 мая 2019 г., № 24/33 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21934304p>. – Дата доступа: 21.11.2021.
4. Селезнев, В. И. Строительство наружных трубопроводов водоснабжения и водоотведения : метод. пособие по выполнению курсового проекта и раздела дипломного проекта по дисциплине «Техника и технология строительного-монтажных работ» для студентов спец-ти 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» / В. И. Селезнев, Г. А. Коревицкий. – Минск : БНТУ, 2012. – 97 с.
5. Белецкий, Б. Ф. Технология и механизация строительного производства : учебник для вузов / Б. Ф. Белецкий. – Ростов н/Д : Феникс, 2003. – 752 с.

Поступила 6 декабря 2021 г.