

3 Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем: Теория и методы расчета. – М.: Сов. радио, 1974. – 232 с.

4 Савелова Т.И. Об оптимальной регуляризации операторных уравнений с погрешностями в задании оператора и правой части // АН СССР. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1977. – Т.7. – № 6. – С. 1579 – 1583.

5 Мизгайлов В.Н., Мухин В.В., Романов В.А. Об оптимальной статистической регуляризации операторных уравнений с ограничением на норму решения // АН СССР, Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1979. – № 4. – С. 1036 – 1040.

Получено 25.04.2002

V. N. Mizgaylov, D. N. Zelinski. Optimum constructive synthesis radiating systems, including radioholographic.

The optimum algorithms for decision tasks of synthesis radiating systems any physical type under the given orientation diagram are considered, when the task operators are constructed experimentally and on the decisions the technical restrictions are imposed. The tasks of practical synthesis are considered as incorrect tasks of mathematical physics. The estimations of accuracy of the task synthesis decision are given.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2002. № 1 (4)

УДК 656. 071.13

С. А. ПОЖИДАЕВ, аспирант; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС В ПРОЕКТАХ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛАНИРОВКИ ТРАНСПОРТНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Предлагается использовать сплайновый метод для автоматизации расчетов земляных масс в проектах вертикальной планировки сооружений транспортных коммуникаций, в основе которого лежит применение интеграционных свойств кубического сплайна на регулярной сетке GRID – модели.

В современных рыночных условиях хозяйствования требования к проектным решениям при разработке вертикальной планировки инженерных сооружений значительно возросли. Во избежание финансовых потерь проектных организаций и заказчиков методы расчета объемов земляных работ должны быть надежными, обеспечивать заданную точность расчета, полученные значения должны неоднократно проверяться с использованием альтернативных методов. Автоматизация расчетов объемов земляных работ позволяет рассмотреть большое количество проектных вариантов и получить оптимальные параметры проектов.

При проектировании вертикальной планировки транспортных коммуникаций могут применяться следующие методы определения объемов земляных работ: *метод горизонтальных профилей, метод изолиний рабочих отметок, метод квадратов, метод треугольных призм, метод поперечных профилей, метод квадратов с аппроксимацией естественного рельефа поверхностями n-порядка*. Все они являются проверенными, надежными методами ручного счета. Опыт их использования позволяет сделать следующие выводы:

1 Основными методами расчета объемов земляных работ при проектировании вертикальной пла-

нировки являются метод квадратов и его модификации (проектирование площадных сооружений) и метод поперечных профилей (проектирование линейных сооружений). Не выяснено, каковы основные источники погрешностей определения объемов земли по ним.

2 Опыт применения указанных методов в автоматизированных системах показывает, что простое копирование технологии ручного расчета создает значительные трудности при разработке программ (практически невозможно формализовать все различные ситуации, которые могут встретиться при расчетах). Применяемые при этом формулы основаны на линейной интерполяции отметок промежуточных точек и на правилах элементарной геометрии.

3 Для повышения точности расчетов используют нелинейные функции, которые поддаются интегрированию, однако применение таких функций сопровождается рядом серьезных недостатков.

4 На основе регулярной двумерной сплайновой математической модели местности (GRID- и TIN-модели) и интегральных вычислений в автоматизированных системах может быть применен сплайновый метод расчета объемов земляных работ. Сплайн-функции хорошо дифференцируются

и интегрируются. На основе свойств сплайнов возможно их применение и как функций описания поперечных профилей линейных сооружений, особенно при проектировании поперечников обтекаемого типа и индивидуальных поперечных профилей, а также еще в ряде случаев.

Основой двумерной сплайновой математической модели местности (рельефа) является регулярная цифровая модель в виде значений высот узлов квадратной (прямоугольной) сетки поверхности с заданным шагом (стороной) – *GRID-модель*. Для построения двумерных сплайновых математических моделей местности разработаны эффективные алгоритмы. Применение сплайн-функций позволит улучшить такие важнейшие параметры проекта, как точность выполненных расчетов (и их автоматизация) и обеспечение безопасности функционирования проектируемых транспортных объектов.

Точность предлагаемого сплайнового метода расчета объемов земляных работ обуславливается большой адекватностью двумерных сплайновых моделей местности реальным поверхностям земли и выбором обоснованного шага сетки.

От величины шага такой сетки, т. е. от расстояния между ее узлами зависит точность интерполирования сплайновой моделью. Для этих моделей выполнен расчет величины максимального шага сетки, обеспечивающий заданную точность интерполирования для категорий рельефа местности, наиболее распространенных на территории Республики Беларусь (плоскоравнинный и равнинный пересеченный и всхолмленный). В то же время, если высоты узловых точек определяются с некоторой погрешностью, особенно при подготовке цифровых моделей с использованием карт и планов, произведен расчет оптимального шага сетки, при котором погрешность аппроксимации производной функции минимальна. Использовать шаг сетки меньше оптимального для повышения точности расчетов смысла не имеет, т.к. это приведет к прямо противоположному результату. Выполнен расчет оптимального и максимального шагов сетки для местности с монотонным характером и с пиковыми точками перелома профиля. Используя интервальное значение шага сетки (оптимальный шаг–максимальный шаг), проектировщик может быстро и обоснованно подготовить цифровую модель местности с равномерным шагом. Для подготовки сетки с неравномерным шагом, который является предпочтительным, т.к. уменьшает число узлов, можно воспользоваться специально разработанными номограммами.

Лучшая адекватность сплайновых моделей местности определяется тем, что сплайн-функция ве-

дет себя плавно в точках перелома профиля, и ей можно задать поверхность любой сложности. Такую плавность придает наличие в формуле сплайн-функции значений ее первых производных. Таким образом, через значения первых производных сплайн обладает нелокальными свойствами, т.е. он «знает» о поведении земной поверхности в целом на заданном направлении (при спуске значения производных отрицательные, при подъеме – положительные). В то же время существенное влияние на величину сплайна в промежуточных точках оказывают лишь те значения аппроксимируемой функции, вблизи которых эта точка расположена. В этом заключаются локальные свойства сплайна. Нелокальные свойства сплайнов отличают их от линейной интерполяции.

Безопасность функционирования проектируемых объектов обеспечивается возможностью проектирования гладких проектных поверхностей, получаемых на основе сплайновых математических моделей местности. Особенно это необходимо при проектировании продольных профилей сортировочных горок, при проектировании обтекаемых поперечных профилей автомобильных дорог и других объектов.

Для расчета объемов земляных работ по обтекаемым поперечникам невозможно использовать формулы, основанные на приемах элементарной геометрии. Кроме того, применение таких поперечников способствует уменьшению объемов земляных работ.

Обтекаемое земляное полотно имеет ряд преимуществ по сравнению с земляным полотном геометрически правильных очертаний. Прежде всего повышается безопасность движения, т. к. при наличии округленных лотков автомобиль, потерявший управление, может съехать по пологому откосу обтекаемого поперечника на полосу отвода, расчищенную от препятствий; повышается психологическая уверенность водителей, т. к. они видят весь откос, а не одну бровку земляного полотна, как на дороге с крутыми откосами; обеспечивается лучшее обтекание земляного полотна снеговетровым потоком, в результате чего снег переносится через дорогу, не откладываясь на проезжей части. Кроме того, пологие откосы обтекаемого поперечника меньше размываются водой и быстрее зарастают травой, увеличивается испарение влаги из земляного полотна, что благоприятно влияет на его водно-тепловой режим, пологие откосы переменной крутизны обтекаемых поперечников позволяют плавно сочетать земляное полотно с прилегающей местностью.

Применение сплайновых математических моделей местности в проектах вертикальной планиров-

ки транспортных коммуникаций требует разработки соответствующего сплайнового метода расчета объемов земляных работ.

Предлагаемый метод автоматизированного расчета объемов земляных работ основывается на свойствах сплайнов хорошо интегрироваться и дифференцироваться.

$$V = \sum_{j=0}^{x[C]} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j} (f_{i,j} + f_{i+1,j}) + \frac{1}{12} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j}^2 (m_{i,j} - m_{i+1,j}) \right\} d \Big|_{j=j+d},$$

где C – число горизонтальных линий сетки с рабочими отметками в узлах; R – то же, число вертикальных линий сетки; d – шаг изменения параметра j (шаг интегрирования).

Расчеты могут производиться с любой точностью ϵ , однако фактически достаточно принимать $\epsilon=0,001$ м. При большей точности происходит

объем насыпи

$$VN = \sum_{j=0}^{x[C]} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j} (r^+_{i,j} + r^+_{i+1,j}) + \frac{1}{2} \sum_k^{N_k} L_0 r^+_k + \frac{1}{12} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j}^2 (m^+_{i,j} - m^+_{i+1,j}) \right\} d \Big|_{j=j+d},$$

объем выемки

$$VV = \sum_{j=0}^{x[C]} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j} (r^-_{i,j} + r^-_{i+1,j}) + \frac{1}{2} \sum_k^{N_k} L_0 r^-_k + \frac{1}{12} \sum_{i=0}^{R-1} h_{i,j}^2 (m^-_{i,j} - m^-_{i+1,j}) \right\} d \Big|_{j=j+d},$$

где r^+ , r^- – соответственно положительные и отрицательные рабочие отметки в расчетных точках; m ; N_k – общее количество нулевых точек при переходе от положительных рабочих отметок к отрицательным и наоборот; L_0 – расстояние между точкой нулевых работ и расчетной точкой, м.

Расстояния между точками нулевых работ и расчетными точками (вершинами сетки квадратов) определяются на основе сплайновой интерполяции.

На основе представленных формул разработан программный модуль и выполнены практические расчеты. Программа-модуль *Vol_2dsp* будет выглядеть следующим образом (основные блоки):

{Блок вычисления площади поперечного сечения поверхности}

```
Nom_vert:=1;
For p:=0 To (N-1) Do
Begin
If (f[p]>0) and (f[p+1]>0) Then Begin
Sum2N[Nom_gor,Nom_vert]:=
=h[p]*(f[p]+f[p+1])/2;
Sum1N[Nom_gor,Nom_vert]:=
=Sqr(h[p])*(m[p]-m[p+1])/12; End;
If (f[p]<0) and (f[p+1]<0) Then Begin
Sum2V[Nom_gor,Nom_vert]:=
```

Суть предлагаемого метода заключается в двойном интегрировании заданной поверхности в виде регулярной сплайновой двухмерной математической модели местности и последующего вычисления объемов земляных работ. В сплайновой математической модели двойной интеграл определяется следующим образом:

уточнение сотых и тысячных долей объемов работ, что не требуется.

Приведенная выше формула расчета V является балансовой, так как не учитывает разделение поверхности линией нулевых работ на насыпи и выемки.

Для расчета объемов насыпи и выемки отдельно получены следующие формулы:

```
= h[p]*(f[p]+f[p+1])/2;
Sum1V[Nom_gor,Nom_vert]:=
=Sqr(h[p])*(m[p]-m[p+1])/12; End;
If (f[p]>0) and (f[p+1]<0) Then Begin
horda(f[p],f[p+1],0,h[p],m[p],m[p+1],L0);
Sum2N[Nom_gor,Nom_vert]:=
=L0*f[p]/2;
Sum1N[Nom_gor,Nom_vert]:=
=Sqr(h[p])*(m[p]-m[p+1])/12;
Sum2V[Nom_gor,Nom_vert]:=
=(h[p]-L0)*f[p+1]/2; End;
If (f[p]<0) and (f[p+1]>0) Then Begin
horda(f[p],f[p+1],0,h[p],m[p],m[p+1],L0);
Sum2V[Nom_gor,Nom_vert]:=
=L0*f[p]/2;
Sum1V[Nom_gor,Nom_vert]:=
=Sqr(h[p])*(m[p]-m[p+1])/12;
Sum2N[Nom_gor,Nom_vert]:=
=(h[p]-L0)*f[p+1]/2; End;
Inc(Nom_vert);
End;
{Блок вычисления площади поперечника и
объема элем. области в m. dv}
ind:=1;V:=0;VN_K:=0;VK_K:=0;
Repeat
```

```

For jd:=0 To R Do Begin
For id:=0 To C Do Hx[id]:=Hr[id,jd];
Main_spl(Hx,xd,C,dv,Hpd[jd]); End;
Main_spl(Hpd,yd,R,0,Sp);
For jd:=1 To R Do Begin
VN[Nom_gor,jd]:=VN[Nom_gor,jd]+
+ Eps*(Sum2N[Nom_gor,jd]+
+ Sum1N[Nom_gor,jd]);
VK[Nom_gor,jd]:=VK[Nom_gor,jd]+
+ Eps*(Sum2V[Nom_gor,jd]+
+ Sum1V[Nom_gor,jd]); End;
dv:=dv+Eps;
If Int(dv)=xd[Nom_gor] Then Inc(Nom_gor);
Inc(ind);
Until Int(dv)>xd[C];

```

В расчетах сравнивались линейный (по средней рабочей отметке) и сплайновый методы. Результаты

Список литературы

- 1 Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
- 2 Понарин А. С. Математические модели в трассировании железных дорог: Автореферат. – М., 1995. – 47 с.
- 3 Бабков В. Ф. Ландшафтное проектирование автомобильных дорог: Учебное пособие для автомобильно-дорожных вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 189 с.
- 4 Изыскания и проектирование железных дорог: Учеб-

расчетов показывают хорошую сходимость методов для случаев задания проектных поверхностей, имеющих в основном только положительные или только отрицательные рабочие отметки. Это объясняется тем, что значения первых производных сплайновой интерполяции (а именно этим сплайновая интерполяция отличается от линейной) взаимно компенсируются. В то же время, при расчете балансовой поверхности абсолютные и относительные погрешности между сплайновой и линейной аппроксимациями оказались значительны. Относительная погрешность составила 10 % и более. Баланс же объемов выемки и насыпи во всех случаях не превышал нормируемой величины (3 %), что не позволяет локализовать ошибку в расчетах в случае линейной аппроксимации. Полученные результаты свидетельствуют в пользу предлагаемого автоматизированного метода расчета объемов земляных работ на основе сплайновых моделей.

ник для вузов ж. – д. трансп. //И. В. Турбин, А. В. Гавриленков, И. И. Кантор и др.; Под ред. И. В. Турбина. М.: Транспорт, 1989. – 479 с.

5 Мацкель С. С. Расчет элементов станций на ЭВМ. – М.: Транспорт, 1980. – 176 с.

6 Изыскания и проектирование аэродромов: Учебник для вузов //Г. И. Глушков, В. Ф. Бабков, В. Е. Тригони и др.; Под ред. Г. И. Глушкова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1992. – 463 с.

7 Парамонов А. Г. Геодезические работы при вертикальной планировке. – М.: Недра, 1984. – 152 с.

Получено 04.07.2002

S. A. Pogidaev. Automation of Soil Volume Estimation in Projects of Vertical Planing of Transport Communications.

Proposed to use spline method for the automation of soil volume estimation in projects of vertical planing of transport communications based on the application of integrated properties of cubic splines on regular GRID – models.