



*Е.А. Ильичев, Н.М. Дементьев*  
Вологодский государственный университет

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ МНОГООЧКОВЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С УЧЕТОМ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

Предлагается метод расчета на прочность конструкций водопропускных автодорожных труб, устраиваемых на пучинистых грунтах. Рассматриваются многоочковые водопропускные трубы замкнутого прямоугольного профиля. Расчетная схема конструкции рассматривается как призматическая оболочка средней длины, опирающаяся на упругое винклеровское основание, для расчета которой применяется полубезмоментная вариационная теория В.З. Власова. Базисные функции вертикальных перемещений определяются с помощью статической аппроксимации с учетом сил морозного пучения.

Тонкостенные пространственные системы, призматическая оболочка, вариационная теория В.З. Власова, статическая аппроксимация, многоочковые водопропускные трубы прямоугольного профиля, силы морозного пучения.

Водопропускные трубы являются ответственными сооружениями на автомобильных дорогах. От их надежной работы в течение запланированного расчетного срока службы зависит эксплуатация всего участка дороги, на котором они устраиваются. Поэтому проблема обеспечения прочности таких инженерных сооружений является актуальной задачей.

В дорожном строительстве широко применяют железобетонные водопропускные трубы, которые состоят из отдельных элементов-звеньев круглой, прямоугольной или арочной формы в поперечном сечении [1]. На участках дороги с низкой высотой насыпи и при относительно больших расходах водотока наиболее выгодным является устройство многоочковых труб замкнутого прямоугольного сечения (рис. 1). Звенья таких труб рассчитываются как плоские рамы замкнутого контура на действие давления грунта и нагрузки от транспорта с учетом взаимодействия элементов между собой и основанием [2].

При проектировании и расчете труб на дорогах, расположенных в зоне сезонного промерзания грунтов наряду с нагрузками от транспорта и веса грунта засыпки, необходимо учитывать действие на соору-

жение сил морозного пучения. В сборной конструкции под действием сил морозного пучения в холодный период за счет неравномерного вертикального перемещения грунтового основания на стыке звеньев возникают краевые силы и моменты, которые вызывают дополнительные изгибные напряжения [7]. Наряду с этим нередко швы между звеньями труб устраиваются вследствие неравномерной просадки основания в период оттаивания грунта. В результате в проектах приходится предусматривать укладку звеньев на сборный или монолитный фундамент [1], что приводит к удорожанию стоимости строительства сооружения.

В связи с этим в таких условиях наиболее оправданным является применение многоочковой водопропускной трубы в монолитном исполнении. Монолитная многоконтурная коробчатая конструкция, уложенная на спрофилированное грунтовое ложе или гравийно-песчаную подушку, будет обладать более высокой общей изгибной жесткостью за счет отсутствия швов и включения в работу материала всей конструкции, а также нивелировать неравномерный подъем грунта основания.

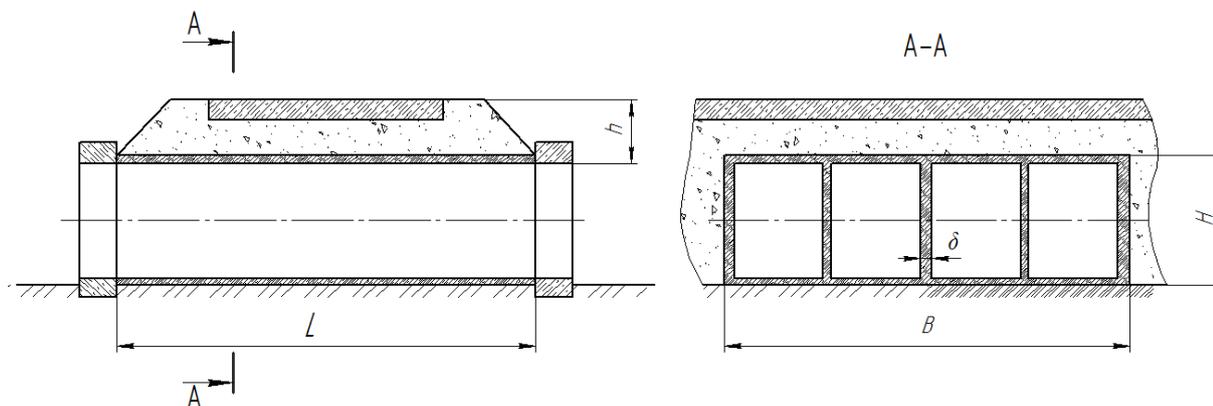


Рис. 1. Многоочковая водопропускная труба замкнутого прямоугольного сечения

Вместе с тем с точки зрения расчета такие трубы, имеющие геометрические размеры длины к ширине в пределах 1,5÷6, с учетом рекомендованной толщины стенки [1] оказываются тонкостенными конструкциями средней длины, в которых необходимо учитывать пространственную работу [3]. В результате расчетную схему многоочковой трубы следует рассматривать как призматическую оболочку многоконтурного сечения.

В предлагаемом подходе к пространственному расчету многоочковых водопропускных труб прямоугольного профиля на упругом основании с учетом сил морозного пучения используется вариационная теория призматических оболочек В.З. Власова [3] в сочетании со статической аппроксимацией базисных функций перемещений. В работах [5, 6] подобный подход применялся для расчета призматических оболочек на упругом винклеровском основании на действие постоянных и временных нагрузок. Вместе с тем учет сил морозного пучения при исследовании поведения конструкций на стадии их эксплуатации с целью правильного решения вопросов проектирования имеет важное как научное, так и практическое значение.

В рассматриваемом методе при расчете призматической оболочки многоочковой трубы предлагается не учитывать касательные силы морозного пучения, которые действуют по боковым граням оболочки, соприкасающихся с замерзшим грунтом, в связи с тем, что в дорожном строительстве активно применяют обмазки и покрытия, препятствующих смерзанию поверхностей конструкции с грунтом. В результате на сооружение будут действовать нормальные силы морозного пучения, приложенные по нижней поверхности конструкции (рис. 2).

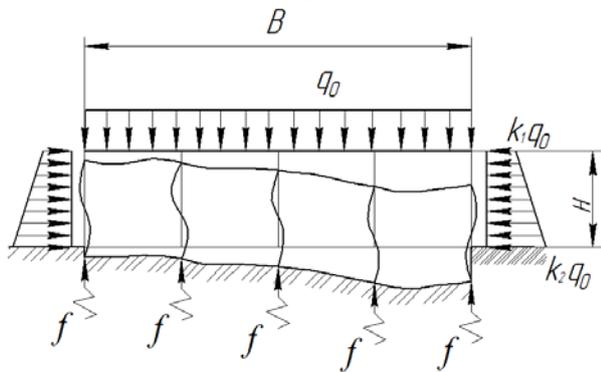


Рис. 2. Поперечное сечение расчетной схемы многоочковой трубы

Изгиб оболочки на упругом основании описывается двумя дифференциальными уравнениями [5,6]:

а) изгиб оболочки как балки с жестким недеформируемым контуром:

$$Y^{IV}(z) + 4\alpha^4 Y(z) = \frac{q(z)}{EI},$$

где  $\alpha = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}}$ , (1)

здесь  $Y(z)$  – прогиб оболочки как балки на упругом основании;

$k$  – коэффициент постели упругого основания;

$B$  – ширина поперечного сечения оболочки;

$EI$  – изгибная жесткость конструкции относительно горизонтальной центральной оси.

б) изгиб оболочки от деформации контура поперечного сечения:

$$V^{IV}(z) + 4\beta^4 V(z) = \frac{q_0(z)}{E\dot{a}_0}$$

где  $\beta = \sqrt[4]{\frac{s_0}{4a_0}}$ , (2)

здесь  $V(z)$  – функция обобщенных поперечных перемещений,

$$s_0 = \frac{1}{E} \int \frac{\bar{M}^2(s)}{EI_1} ds,$$

где  $\bar{M}(s)$  – изгибающие моменты в элементарной раме-полоске шириной  $dz=1$  от единичного узлового нагружения;

$I_1$  – моменты инерции стержней элементарной рамы-полоски;

$$a_0 = \delta \int \varphi^2(s) \cdot ds, \quad q_0(z) = \int q(z) \psi(s) \cdot ds,$$

где  $\varphi(s)$  и  $\psi(s)$  базисные функции перемещений связанные соотношениями:  $\varphi'_i(s) = \psi_i(s)$  (рис. 3).

Базисные функции перемещений удобно определять с помощью статической аппроксимации, загружая элементарную раму-полоску, вырезанную из оболочки двумя смежными сечениями, дополнительными силами морозного пучения в положении статического равновесия, установившегося после приложения всех постоянных и временных нагрузок (рис. 3).

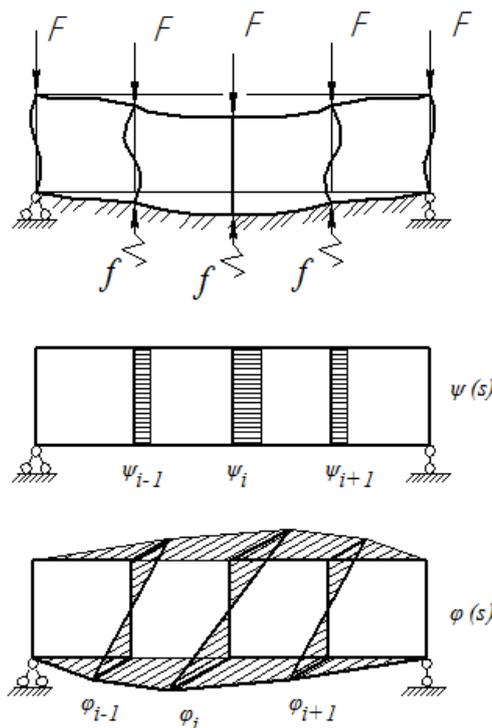


Рис. 3. Статическая аппроксимация базисных функций поперечных и продольных перемещений

Величину сил морозного пучения ввиду отсутствия экспериментальных данных можно принять из расчета 0,06 кг/см<sup>2</sup> на 1 см замороженного слоя грунта согласно п. 10 приложения 6 [3], что коррелируется с оценкой возможных нормальных сил морозного пучения, приведенной также в [5, 6].

Результаты расчета по предлагаемой методике 4-х очковой монолитной железобетонной водопропускной трубы ( $\gamma_{\sigma}=2,4 \text{ т/м}^3$ ,  $E_{\sigma}=332 \cdot 10^4 \text{ т/м}^2$ ) с размерами в плане  $B \times L=8 \times 24 \text{ м}$ , высотой 2 м и толщиной всех ребер и плит 200 мм, заложеной под насыпью высотой  $h=1,5 \text{ м}$  ( $\gamma_{sp}=1,5 \text{ т/м}^3$ ,  $\varphi_{sp}=24^\circ$ , вес дорожной одежды  $1,25 \text{ т/м}^2$ , нагрузка от колонны автомобилей  $1,1 \text{ т/м}$ ), показали, что для слабо- или среднепучинистого грунта основания (супесь) при глубине промерзания 1 м величина наибольшего перемещения нижней плиты за счет сил морозного пучения составляет 55,87 мм, а напряжения продольного направления  $\max \sigma_z$ , которыми обусловлена пространственная работа конструкции увеличились в 17 раз до  $2300 \text{ т/м}^2$  в сравнении с расчетом конструкции без учета сил морозного пучения ( $\max \sigma_z = 133 \text{ т/м}^2$ ).

Результаты расчетов на ЭВМ с использованием вычислительных комплексов подтвердили применимость предлагаемой методики на практике. Полученные расчетом значения напряжений и перемещений достаточно близко совпали с полученными на ЭВМ, что позволяет использовать методику для оценки достоверности численного расчета таких конструкций.

#### Литература

1. ГОСТ 32871-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Трубы дорожные водопропускные. Технические требования: введ. 01.07.2015. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

2. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы: актуализированная ред. СНиП 3.06.04-91. – Москва, 2012. – 106 с.

3. СНиП II-15-74. Основания зданий и сооружений. Строительные нормы и правила. – Москва: Госстрой СССР, 1974. – 65 с.

4. Власов, В. З. Тонкостенные пространственные системы / В. З. Власов. – Москва: Госстройиздат, 1958. – 502 с.

5. Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР. – Москва, 1985. – 60 с.

6. Юшков, Б. С. Работоспособность водопропускных труб устраиваемых на глинистых грунтах [Электронный ресурс] / Б. С. Юшков, А. С. Желтышева // Наукоедение: интернет-журнал. – 2015. – Т. 7, № 5. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/15KO615.pdf>.

7. Ильичев, Е. А. К вопросу расчета многоконтурных призматических оболочек средней длины на неоднородном по длине упругом основании / Е. А. Ильичев // Вузовская наука – региону: материалы XV Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 28 февраля 2017 г. / [отв. ред. Л. И. Соколов]. – Вологда, 2017. – С. 18–20.

8. Соколов, О. Л. Пространственный расчет подземных сооружений как призматических оболочек в податливой среде / О. Л. Соколов. – Вологда: ВоГТУ, 2010. – 256 с.

9. Яковлев, Ю. М. Строительство водопропускных труб на автомобильных дорогах / Ю. М. Яковлев, М. Г. Горячев. – Москва: МАДИ, 2011. – 126 с.

**E.A. Ilchev, N.M. Dementev**  
Vologda State University

### STRUCTURAL ANALYSIS OF MULTIWAY CULVERT BOXES ON ELASTIC FOUNDATION UNDER THE INFLUENCE OF FROST HEAVING FORCES

A method of the structural analysis of culvert boxes based on elastic foundation under the influence of frost heaving forces is proposed. Multiway culvert boxes are considered. The construction is considered as a prismatic shell of average length based on Winkler foundation, for calculation of which V.Z. Vlasov's variational theory is used. The basic functions of vertical movements are determined by the static approximation considering frost heaving forces.

Thin-walled spatial systems, prismatic shell, V.Z. Vlasov's variational theory, static approximation, culvert boxes, frost heaving forces.