

УДК 539.3

*к.т.н. Бурицев Г. Г.,  
Бондарец О. А.  
(ЛГАУ, г. Луганск, ЛНР),  
Левченко Э. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ЕГО ПРОСАДКЕ

*Приведены результаты моделирования, где рассматривается алгоритм исследования напряжённо-деформированного состояния трубопровода при его просадке, позволяющий учитывать изменения физических и геометрических свойств материалов. Обоснован выбор упрощённой модели бесканального трубопровода.*

*Ключевые слова:* трубопровод, просадка, моделирование, напряжённо-деформированное состояние, бесканальная прокладка, дифференциальные уравнения.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Приоритетным направлением повышения надёжности трубопроводов в грунтах является определение фактической схемы деформации основания.

Расчёт системы «грунт – трубопровод» является весьма сложной задачей строительной механики, так как трубопровод деформируется вместе с окружающим его грунтом. Предлагается упрощённая расчётная схема, использующая концепцию деформируемого основания, в рамках варианта теории толстых неоднородных пластин.

В работах В. К. Чибирякова [1, 2] для совместного расчёта трёхмерной среды с различными упругими включениями, например непосредственно в грунт, в качестве расчётной модели рассматриваемой системы используется концепция толстой пластины. Механическое поведение грунта в работах А. А. Мустафаева [3] моделируется сплошной неоднородной средой. Исследования С. Н. Клепикова [4] показали, что введение переменного коэффициента постели устраняет недостатки модели Фусса – Винклера.

**Постановка задачи.** Задачей модельных исследований является анализ напряжённо-деформированного состояния трубопровода при его просадке на основании уточнённой расчётной схемы.

**Изложение материала и его результаты.** Важным резервом снижения материалоемкости при строительстве подземных коммуникаций является их бесканальная прокладка. При такой прокладке трубопроводы одновременно выполняют технологические функции (транспорт жидкости или газа), ограждающие и несущие. Однако расчёт на внутреннее давление не обеспечивает эксплуатационной надёжности, поскольку в процессе эксплуатации трубопровод может подвергаться различным силовым факторам, вызванным в большинстве случаев неравномерными деформациями грунтовой среды.

Особую актуальность эта проблема приобретает при строительстве трубопроводов в лессовых просадочных грунтах. Решение данной задачи требует теоретически обоснованных разработок, достаточно надёжных и удобных в применении методов расчёта подземных коммуникаций, учитывающих совместную их работу с окружающей грунтовой средой. Основным вопросом здесь является выбор расчётной схемы.

Особенностью лессовых просадочных грунтов является значительное изменение механических характеристик в зависимости от влажности. Так, модуль деформации (усреднённая характеристика, играющая роль модуля упругости) таких грунтов при ув-

лажнении уменьшается в несколько раз. Сложность физических явлений, вызывающих просадку, и их нелинейный характер затрудняют математическое описание данного процесса просадки. Кроме того, увлажнение просадочных грунтов в основании подземных трубопроводов является случайным фактором, а расположение источников увлажнения и глубина смачивания грунта могут быть самыми различными. Поэтому определение фактической схемы деформации основания для каждого частного случая затруднительно [5]. В связи с этим целесообразно иметь расчётную схему для общих случаев, которые соответствовали бы характеру деформации лессовых грунтов и самым неблагоприятным условиям увлажнения.

Большая, по сравнению с длинами прямолинейных участков, протяжённость трубопровода с поперечным сечением незначительных размеров позволяет применить для его расчёта стержневую модель. Однако в связи с тем, что трубопровод деформируется совместно с окружающим его грунтом, расчёт системы «грунт – трубопровод» является весьма сложной задачей строительной механики. Обычно при решении подобной задачи переходят к упрощённой расчётной схеме, используя концепцию деформируемого основания. Применение такого подхода позволяет расчлнить систему «грунт – трубопровод» и рассмотреть отдельно расчёт только

трубопровода, учитывая в нём интегральные свойства окружающей среды с помощью коэффициентов, характеризующих отпорные свойства основания и нагрузки, отражающей силовое взаимодействие с лежащим выше грунтом.

Правильный выбор этих величин позволяет получить достоверные сведения о работе системы «грунт – трубопровод», но оценить достоверность такого расчёта можно только на основании уточнённой расчётной схемы. Такая расчётная схема может быть выбрана в рамках принятого варианта теории толстых пластин.

Для расчёта системы «грунт – трубопровод» в условиях просадочных грунтов была использована математическая модель, описываемая уравнениями (1) и (2) с учётом неоднородности грунта.

Предполагается, что механическое поведение грунта можно моделировать сплошной упругой неоднородной средой. Данное допущение не является существенным в рамках принятого подхода.

Расчёт по методу установления позволяет учитывать как физическую, так и геометрическую нелинейность.

Напряжённо-деформированное состояние толстой неоднородной пластины с одномерным дискретным включением, находящейся под действием объёмных сил, описывается следующими системами дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - k_x^r (U_r(x) - U_T(x)) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z - z_T) &= \rho \frac{\partial^2 U_r}{\partial \tau^2} + \rho \frac{\partial U_r}{\partial \tau^2}, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 U_r}{\partial \tau^2} + \beta \frac{\partial V}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} - k_x^T (\omega_r(x) - \omega_T(x)) \cdot \delta(y) \cdot \delta(z - z_T) + F_z &= \rho \cdot \frac{\partial^2 \omega_r}{\partial \tau^2} + \beta \cdot \frac{\partial \omega_r}{\partial \tau}, \quad (1) \\ \sigma_x &= (\lambda^\circ + 2 \cdot \mu^\circ) \cdot \varphi \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \lambda^\circ \cdot \varphi \cdot \frac{\partial V}{\partial y} + \varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \\ \sigma_y &= \lambda^\circ \cdot \varphi \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + (\lambda^\circ + 2 \cdot \mu^\circ) \cdot \varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \lambda^\circ \cdot \varphi \cdot \frac{\partial V}{\partial y}, \\ \sigma_z &= \lambda^\circ \cdot \varphi \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \lambda^\circ \cdot \varphi \cdot \frac{\partial V}{\partial y} + (\lambda^\circ + 2 \cdot \mu^\circ) \cdot \varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial U}{\partial y}, \\ \tau_{xz} &= \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x} + \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial U}{\partial z}, \\ \tau_{yz} &= \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial \omega}{\partial y} + \mu \cdot \varphi \cdot \frac{\partial V}{\partial z}.\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}(EA)_T \cdot \frac{\partial^2 U_T(x)}{\partial x^2} + k_x^T \cdot (U_r(x)) - U_T(x) &= \rho \cdot \frac{\partial^2 U_r(x)}{\partial t^2} + \beta \cdot \frac{\partial U_r(x)}{\partial t}, \\ (EA)_T \cdot \frac{\partial^4 \omega_T(x)}{\partial x^4} + k_x^T \cdot (\omega_r(x)) - \omega_T(x) &= \rho \cdot \frac{\partial^2 \omega_r(x)}{\partial t^2} + \beta \cdot \frac{\partial \omega_r(x)}{\partial t},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $U_T$  и  $\omega_T$  — перемещения трубопровода;  $k_x^T$  и  $k_z^T$  — коэффициенты жёсткости стержней, связывающих грунт и трубопровод;  $E_T$ ,  $A_T$  и  $J_T$  — модули упругости, площадь сечения и момент инерции и трубопровода;  $\delta(y)$  и  $\delta(z-z_T)$  — двумерная дельта-функция Дирака, сосредоточенная в точке  $(y_T, z_T)$ .

Упрощённую схему просадки с позиций механики сплошной среды можно описать следующим образом. В начальный момент времени грунт находится в состоянии естественной влажности. При этом предполагается, что грунтовая среда находится в равновесии под действием объёмных сил, вызванным весом грунта.

В результате замачивания некоторого объёма грунта в этом объёме изменяются физические свойства, в частности уменьшается модуль деформации, грунт становится неоднородным, и поэтому нарушается равновесие всей среды.

Предполагая, что объём увлажнённого грунта известен (из решения задачи фильтрации или по результатам экспериментальных исследований), процесс просадки моделируем процессом деформирования упругого слоя толщиной  $h$ , покоящегося на подстилающем водонепроницаемом грунте, взаимодействие с которым учитывается по модели Фусса – Винклера.

При расчёте по предлагаемому методу реакция окружающей среды на трубопровод вычисляется интегрально, что сглаживает локальные эффекты. И поэтому если не учитывать поведение толщи грунта в

окрестности трубопровода, а ориентироваться только на определение напряжённо-деформированного состояния последнего, то даже простейшая модель грунтовой толщины как сплошной упругой неоднородной среды может привести к удовлетворительным результатам [6].

Известно, что основным недостатком модели Фаусса – Винклера является отсутствие в ней распределённой способности постели для каждого вида основания и его загрузки [6, 7].

Однако, как показали опыты и натурные наблюдения, при увлажнении лессовых грунтов просадка происходит в основном в несущем столбе грунта, а за его пределами деформация основания, как правило, незначительна. Поэтому распределительная способность увлажнённых просадочных грунтов более низкая, чем у естественных оснований.

Таким образом, оставляя в этой модели линейную зависимость между реактивным давлением грунта и его осадкой, коэффициент постели принимаем переменным.

Как выявили исследования С. Н. Клепикова [4], введение переменного коэффициента постели устраняет недостатки модели Фусса – Винклера.

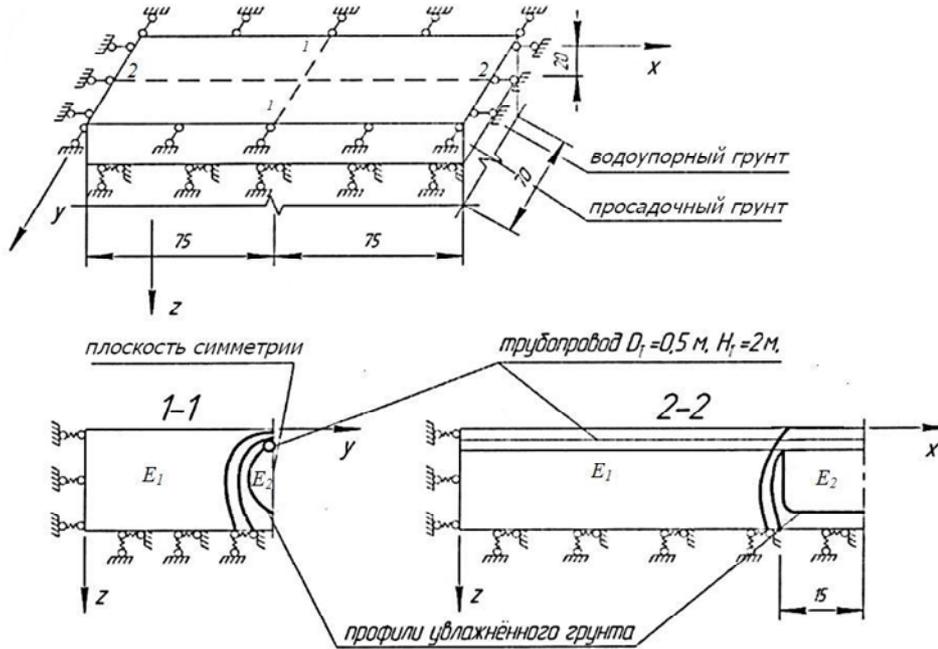
Предполагается, что трубопровод, расчётной моделью которого является прямолинейный стержень, работающий на изгиб, взаимодействует со средой, модель деформации которой  $E_I$ . В результате замачивания определённого объёма грунта модуль

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

деформации в этом объёме изменяется и становится равным  $E_2$ . Вследствие этого нарушается равновесие рассматриваемой системы, происходит деформирование грунта (просадка), при этом деформируется и связанный с грунтом трубопровод.

В расчёте также учитываются перемещения трубопровода в горизонтальном на-

правлении. В зависимости от глубины заложения они могут быть равны нулю или направлены как в сторону источника воздействия, так и в противоположную сторону. Для расчёта выделена конечная часть системы «грунт – трубопровод» в виде прямоугольного параллелепипеда с упругим одномерным включением (рис. 1–3).



НДС ТРУБОПРОВОДА

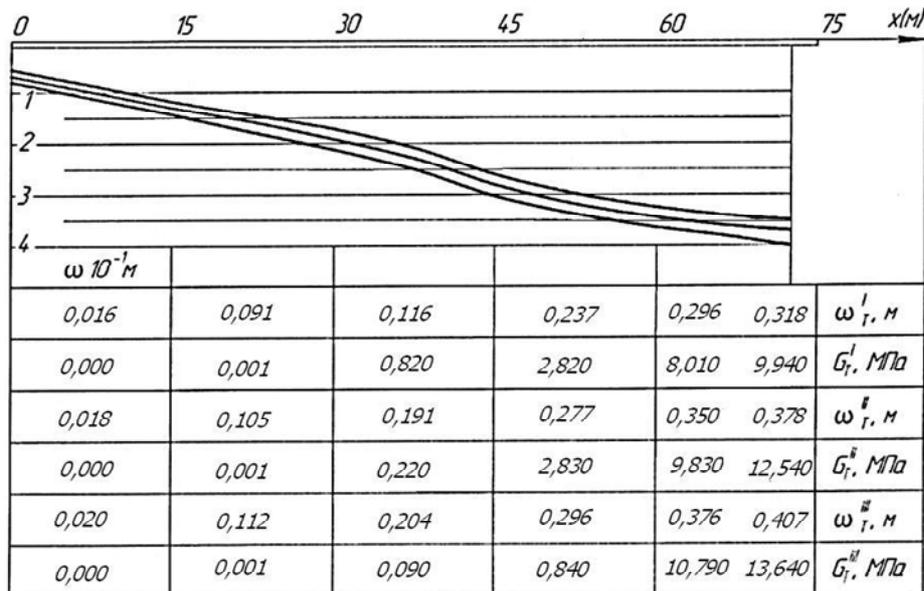


Рисунок 1 Система «грунт – трубопровод»

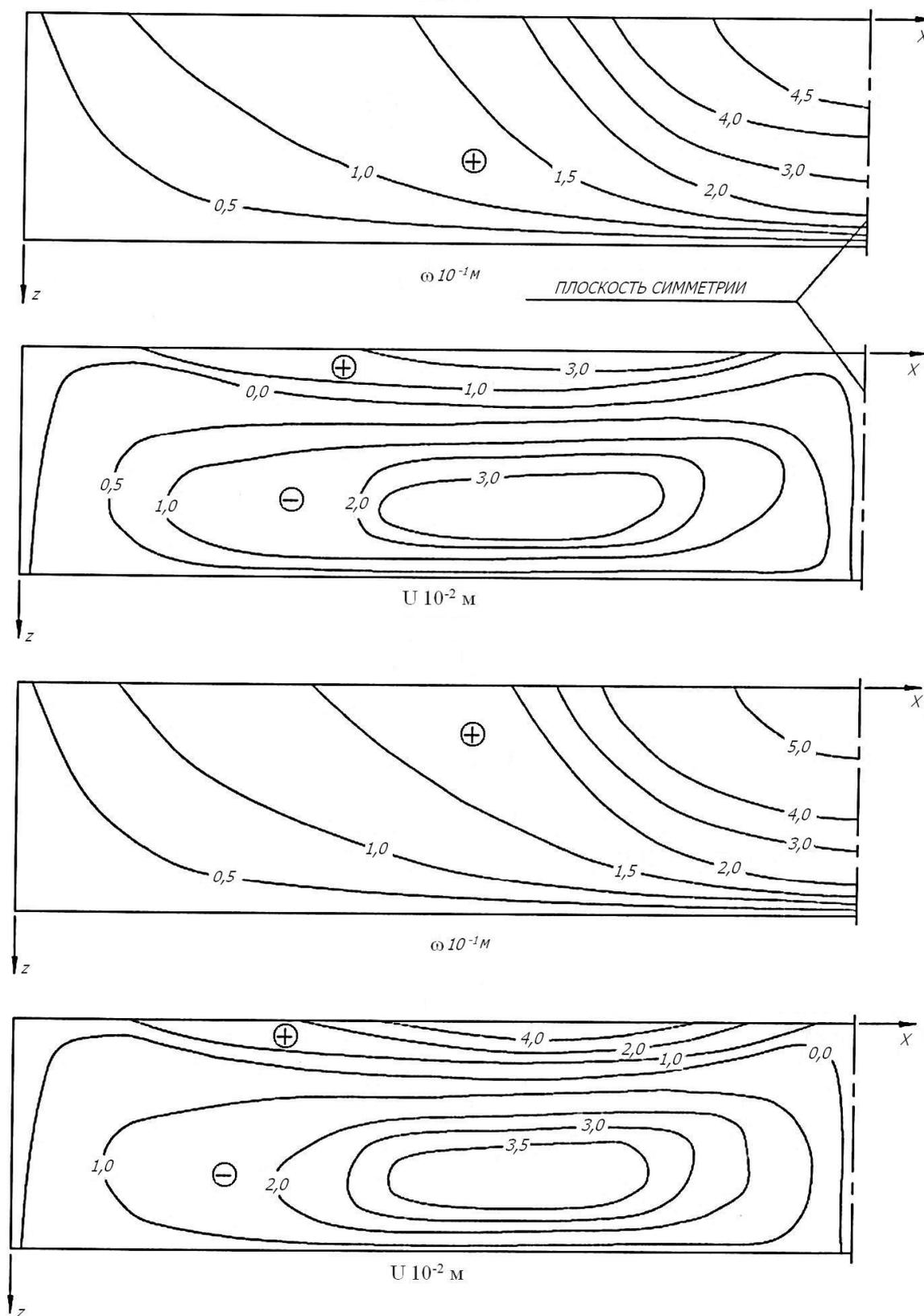


Рисунок 2 Напряжённо-деформированное состояние в грунтовой толще по осям x; z

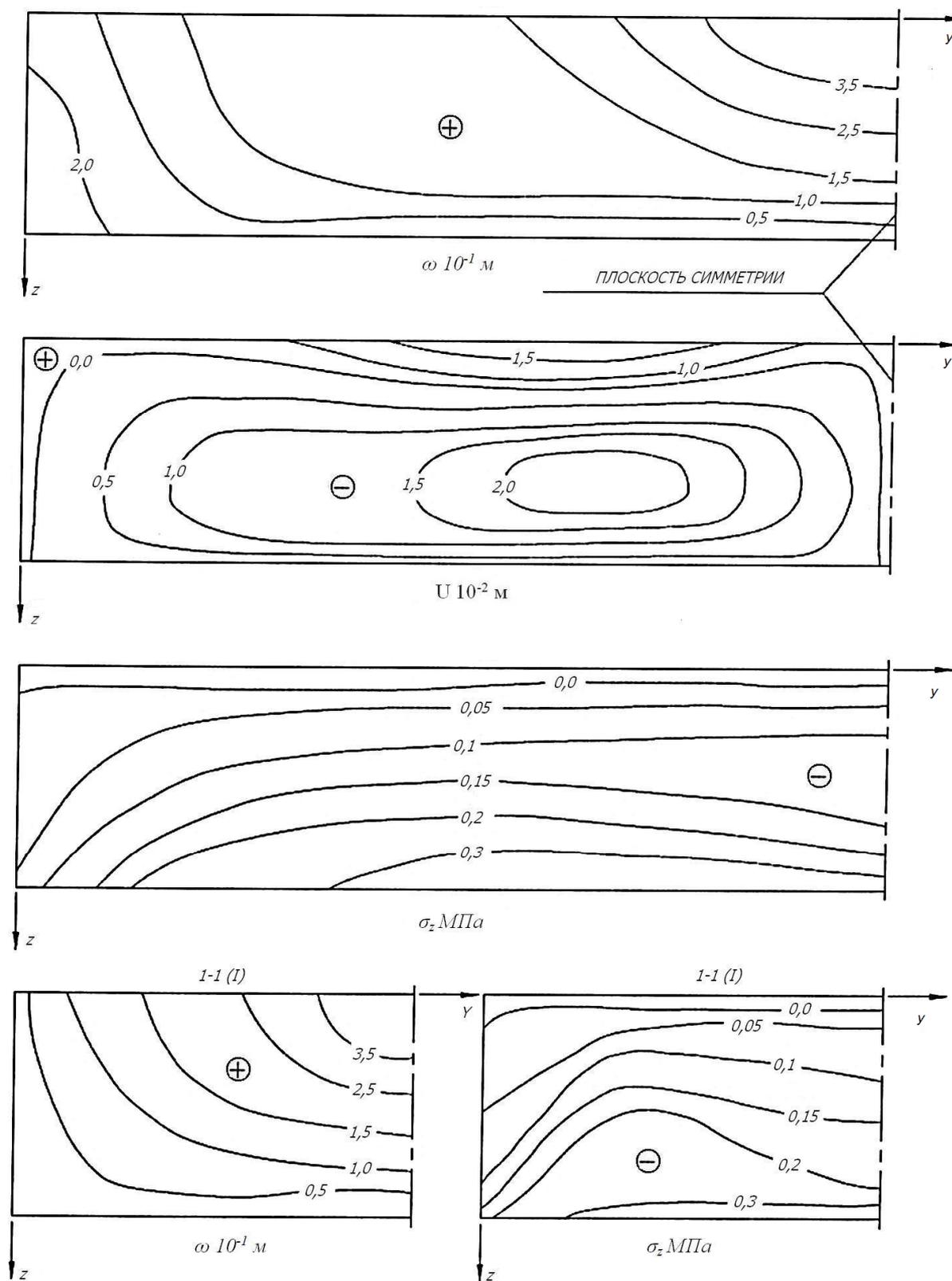


Рисунок 3 Напряженно-деформированное состояние в грунтовой толще по осям  $y$ ;  $z$

Размеры параллелепипеда в плане приняты такими, чтобы на его границе влияние просадки было незначительным. Здесь  $E_1=20$  МПа,  $E_2=4$  МПа.

На нижней боковой поверхности  $z=h^+$  значение коэффициентов жёсткости соответственно равно  $k_x^+ = k_y^+ = k_z^+ = 10$  МПа/м. Диаметр трубопровода  $d=0,5$  м; толщина стенки  $\delta=0,012$  м; модуль упругости  $E_T=2 \cdot 10^5$  МПа; глубина заложения в грунт  $h_T=2$  м.

Таким образом, разработанная модель учитывает внутреннее давление, передаваемое трубопроводу при его эксплуатации, что позволяет более полно оценить многообразные факторы, влияющие на его работу, а также силовые особенности поведения грунта, тем самым существенно повысив надёжность бесканальной прокладки при эксплуатации.

Приведённый подход позволяет снизить затраты материальных ресурсов и повы-

сить надёжность эксплуатации аналогичных систем в сложных условиях, в том числе в лессовых просадочных грунтах.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** С использованием метода установления определено напряжённо-деформированное состояние трубопровода для трёх состояний, характеризующих развитие процесса замачивания (рис. 1–3). Полученные результаты позволили обосновать выбор упрощённой модели бесканального трубопровода. Приведённые на рисунках 2 и 3 данные о напряжённо-деформированном состоянии в грунтовой толще носят иллюстративный характер. Они показывают, что для заданной модели деформирования грунта предлагаемый в настоящей работе подход может дать представление о его напряжённо-деформированном состоянии (в рамках принятой модели).

### Библиографический список

1. Чибиряков, В. К. Уравнения напряжённо-деформированного состояния толстых плит несимметричной структуры [Текст] / В. К. Чибиряков // Сопротивление материалов и теория сооружений. — 1978. — Вып. 32. — С. 82–87.
2. Чибиряков, В. К. Метод установления в задачах статики и квазистатической термоупругости толстых пластин [Текст] / В. К. Чибиряков, Г. Г. Бурцев. — К. : Киевский инж.-строит. ин-т, 1987. — 29 с. — (Деп. в УкрНИИТИ 17.03.87г., № 1247–Ук 87).
3. Мустафаев, А. А. Основы механики просадочных грунтов [Текст] / А. А. Мустафаев. — М. : Стройиздат, 1978. — 296 с.
4. Клепиков, С. Н. Расчёт сооружений на деформируемом основании [Текст] / С. Н. Клепиков. — К. : НИИСК, 1996. — 202 с.
5. Рихтмайер, Р. Разностные методы решения краевых задач [Текст] / Р. Рихтмайер, К. Мортон. — М. : Мир, 1972. — 418 с.
6. Тимошенко, С. П. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М. : Наука, 1979. — 560 с.
7. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. — М. : Наука, 1986. — 616 с.

© Бурцев Г. Г.  
© Бондарец О. А.  
© Левченко Э. П.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В., к.т.н., проф., зав. каф. ЗСАиГ ЛНАУ Рогулиным В. В.*

Статья поступила в редакцию 14.11.18.

к.т.н. Бурцев Г. Г., Бондарець О. А. (ЛНАУ, м. Луганськ, ЛНР), к.т.н. Левченко Е. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ ЙОГО ПРОСІДАННІ

*Наведено результати моделювання, де розглядається алгоритм дослідження напружено-деформованого стану трубопроводу при його просіданні, що дозволяє враховувати зміни фізичних і геометричних властивостей матеріалів. Обґрунтовано вибір спрощеної моделі безканального трубопроводу.*

**Ключові слова:** *трубопровід, просідання, моделювання, напружено-деформований стан, безканальна прокладка, диференціальні рівняння.*

PhD Burtsev G. G., Bondarets O. A. (LNAU, Lugansk, LPR), PhD Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

### MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE PIPELINE DURING ITS DRAWDOWN

*The modeling results are presented, where the algorithm for studying the stress-strain state of the pipeline during its drawdown is considered, allowing to take into account changes in the physical and geometric properties of materials. The choice of the simplified model of channel-free pipeline is justified.*

**Key words:** *pipeline, subsidence, modeling, stress-strain state, channel-free gasket, differential equations.*

