



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Одним из ключевых этапов мероприятий по содержанию автомобильных дорог является мониторинг их состояния. Цель мониторинга – оценка остаточного ресурса для разработки оптимальной стратегии содержания и ремонта автомобильных дорог. Для решения этой задачи используются различные подходы, основанные как на прямых методах контроля (керны), так и на обработке результатов косвенных измерений (модуль упругости, чаши прогиба). Эти методы либо слишком дорогостоящи, либо не дают полной картины состояния конструкции (косвенные измерения). В то же время, известно, что деградация дорожных покрытий – сложный процесс, который в зависимости от многих факторов протекает по-разному. К этим факторам относят: величину и характер циклических транспортных нагрузок, климатические условия, особенности самой конструкции и материалов (природных и искусственных) из которых она состоит. В силу этих причин полной теории и универсальных всеобъемлющих моделей разрушения дорожных одежд к настоящему времени не существует. В то же время, важность задачи диктует постоянный интерес к ней и совершенствование различных подходов к ее решению. Эти подходы в свою очередь, должны опираться на адекватный учет различных факторов, влияющих на деградацию покрытия дороги с одной стороны и на новые технологии – с другой.

В связи с развитием средств подповерхностного зондирования возникли новые методики применения георадарного оборудования для оценки состояния конструкций автомобильных дорог. Например, в связи с появлением и все большей популярностью технологий восстановления на полную глубину (по терминологии в западной литературе Full-depth reclamation (FDR)) к методам контроля и оценки состояния дорожных конструкций предъявляются новые требования.

Данные анализа экономической эффективности и срока службы таких конструкций, как отмечают авторы работы [1], значительно различаются. Это сильно затрудняет использование имеющихся результатов предшествующих обследований автомобильных дорог и препятствует разработке типовых рекомендаций по проектированию и проведению ремонтных мероприятий. Поэтому авторами работы [1] была проведена комплексная оценка участков дорог с использованием как георадаров, так и других методик:

- измерения статического и динамического модулей упругости (resilient modulus, dynamic modulus);
- косвенного определения прочности на растяжение (indirect tensile strength);
- тестирования конструкции с помощью установки ударного нагружения (falling-weight deflectometer FWD);
- оценки экономической эффективности вложений (life-cycle cost analysis – LCCA).

В рамках такого подхода, прежде всего, были проведены отборы кернов на контролируемых участках автодорог. Затем в лабораторных условиях было проведено исследование отобранных образцов на предмет соответствия проектным требованиям и измерены их модуль упругости и прочность на растяжение при ограниченных динамических нагрузках. Далее для оперативной оценки толщины конструктивных слоев дорожной одежды на обследуемом участке использовался георадар. Затем, в выбранных точках определялась величина статического прогиба (D_0) и эффективный структурный показатель (SN_{eff}), называемый также индексом толщины. Полученные значения SN_{eff} использовались для вычисления коэффициентов слоев (a_i) – коэффициентов, определяемых эмпирическим путем, и отражающих функциональные возможности материалов соответствующих слоев. Согласно основному уравнению для SN_{eff} , для многослойной конструкции, он определяется по следующей формуле:

$$SN_{eff} = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3,$$

(1)

где D_i – толщина i -го слоя;

m_i – коэффициент, характеризующий его дренирующие свойства.

С помощью методики в [1], по сути, решается обратная задача – определения значений коэффициентов слоев. Разумеется, структурный показатель формально может быть записан и для каждого слоя в отдельности:



$$SN_1 = a_1 \cdot D_1.$$

(2)

Следует отметить, что, несмотря на относительную простоту задачи определения толщины слоя, значение коэффициента слоя не может быть рассчитано с помощью прямых формул. Это связано с тем, что свойства слоев конструкции определяются совокупностью многих факторов, таких как прочность материала, сдвигоустойчивость, модуль упругости, содержание влаги и даже положение относительно других слоев. С 1962 года в США используется значение $a_1 = 0,44$ для асфальтобетона. Это значение было получено эмпирическим путем по результатам «Дорожного Теста» для нежестких покрытий и используется многими дорожными организациями до настоящего времени. В последнее время в связи с появлением новых материалов – щебеночно-мастичных асфальтобетонов, вечных покрытий (Perpetual Pavement и др.) предпринимаются попытки откорректировать это значение применительно к новым условиям [2]. В то же время проводится разработка методов определения фактических значений этих коэффициентов и эксплуатационных показателей по данным обследований. Смысл этих методов состоит в определении структурного показателя, связанного с эффективным модулем покрытия (общим модулем всех слоев, расположенных на подложке – E_p) формулой вида [2]:

$$SN_{eff} = c_0 \cdot D \cdot \sqrt[3]{E_p}.$$

(3)

где D – общая толщина покрытия на основании (в дюймах);

E_p – эффективный модуль покрытия (модуль всех слоев, лежащих на основании в единицах psi);

c_0 – эмпирический постоянный коэффициент ($c_0 = 0,0045$).

$$d_0 \cdot E_p - k_0 \cdot \frac{E_p}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} = k_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right],$$

(4)

где d_0 – прогиб в центре приложения нагрузки (в тысячных долях дюйма);

M_R – модуль упругости основания (в единицах psi);

D – общая толщина покрытия на основании (в дюймах),

a – радиус пластины (нагрузки, в дюймах),

$k_0 = 1,5 \cdot p \cdot a$,

p – давление нагрузки (в единицах psi).

Модуль упругости основания, являющийся фундаментальным свойством материала, может быть вычислен на основе следующей формулы [2]:

$$M_R = C \cdot \left[\frac{P \cdot (1 - \mu^2)}{\pi r \cdot d_r} \right],$$

(5)

где P – приложенная нагрузка (в фунтах силы);

μ – коэффициент Пуассона;

r – радиальное расстояние, на котором измеряется прогиб (в дюймах);

d_r – величина прогиба на расстоянии r (в тысячных дюйма);

$C = 0,33$ – постоянный коэффициент.



Таким образом, приведенные формулы образуют замкнутую задачу по определению структурного показателя из результатов измерений.

Однако, как уже отмечалось, свойства покрытия и конструкции в целом определяются всей совокупностью влияющих факторов. Отсюда следует важный с практической точки зрения вопрос о влиянии каждого из факторов на общий показатель конструкции в данной точке. Иными словами, если, например, в данной точке получено некоторое значение структурного показателя, то какими факторами обусловлено это значение и его отклонение, например, от значений в соседних точках. Очевидно, что обработка результатов измерений по приведенной выше методике не может дать ответ на этот вопрос, поскольку исходные данные представляют собой лишь интегральные показатели. Они не позволяют ответить на ряд практических вопросов о конкретных причинах, которые привели к зафиксированному состоянию конструкции в данный момент времени. Поэтому весьма актуальной является задача определения не только интегральных (совокупных) характеристик конструкции, но и вклада каждого компонента конструкции (слоя) в итоговый результат и главное – выяснение причины (или комплекса причин), вызвавших отклонения в характеристиках.

Эффективным потенциалом для решения данной задачи обладают методы подповерхностного зондирования и соответствующие средства (георадары). Современные георадары вместе с программным обеспечением, созданным на основе соответствующих алгоритмов обработки импульсных сигналов, позволяют определять не только временные задержки сигналов (для построения георадарного профиля), но и толщины конструктивных слоев покрытия, а также электрофизические характеристики материалов слоев. Электрофизические характеристики материалов конструктивных слоев дорожных одежд (в первую очередь, ϵ), в свою очередь, существенным образом зависят от таких важных для практических приложений физико-механических показателей как влажность, пористость, плотность (степень уплотнения) [3]. Для практических приложений важную роль играет информация о содержании влаги (в различных формах), плотности и пористости материалов. Поэтому в данной работе рассмотрим методику определения толщины и плотности материалов слоев основания дорожной одежды с помощью георадаров и ее влияние на общие показатели конструкции.

Стандартная обработка сигналов георадара подразумевает в первую очередь определение времени задержки (или просто задержки) сигнала, отраженного от внутренних неоднородностей исследуемой конструкции (границы слоев). Главная же проблема интерпретации георадарных данных – зависимость задержки, как от толщины слоев, так и от их диэлектрической проницаемости. Иными словами, при изменении задержки будет непонятно – чем это вызвано, изменением толщины слоя или, допустим, изменением пористости (или влагосодержания) материала.

Поэтому предлагается использовать следующий вариант решения данной проблемы, состоящий в разбиении исходной задачи на две составляющие: определение диэлектрической проницаемости слоя (и связанного с этим параметра – плотности) и последующее определение его толщины. Для этого понадобится дополнительная операция – так называемая калибровка. Суть этой операции состоит в первоначальном измерении характеристик сигнала, отраженного от тонкого листа металла, лежащего на поверхности слоя.

Сначала для ясности изложения рассмотрим задачу для однослойной структуры, то есть для слоя, лежащего на бесконечно толстом основании (рис. 1).

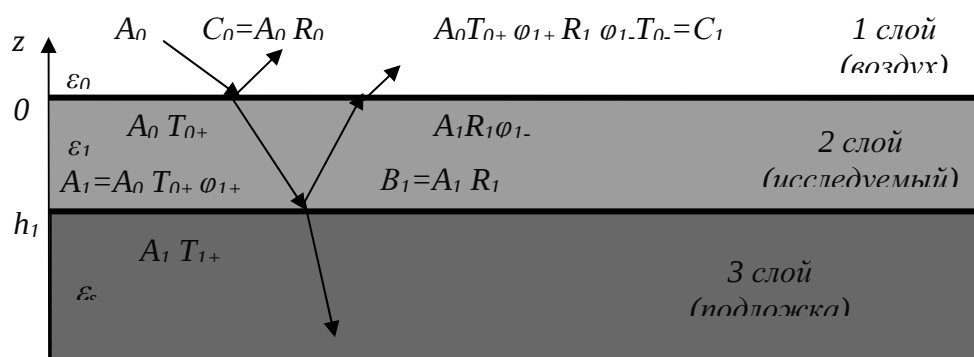


Рисунок 1 - Исследуемая структура и обозначения характеристик поля



В таком случае в приемную антенну георадара сначала попадет сигнал, отраженный от верхней границы слоя. Затем придет сигнал, отраженный от нижней границы слоя и прошедший сквозь верхнюю границу обратно к антенне. При каждом отражении от границы или прохождении сквозь границу часть энергии сигнала уходит на сопутствующий процесс прохождения (отражения от) границы. Соответственно амплитуды таких сигналов, которые называют переотраженными, быстро уменьшаются и их учитывать не будем. Обозначим амплитуды волн (сигналов), распространяющихся вниз (рис.1) A_0 , A_1 . Амплитуды волн, распространяющихся вверх, будем обозначать B_1 , B_2 . Отношения этих амплитуд после отражения или прохождения к исходным будем называть коэффициентами отражения или прохождения, и обозначать R и T соответственно. Снабдим эти коэффициенты индексами, определенными номером соответствующей границы. Таким образом, R_0 – коэффициент отражения от верхней границы слоя.

Из теории электромагнетизма известно, что коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн через плоскую границу раздела двух диэлектриков связаны с диэлектрическими проницаемостями сред соотношениями [4,5]:

$$R_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}, \quad T_{0+} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}, \quad T_{0-} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}. \quad (6)$$

Индексы 0+ и 0- в последних соотношениях означают, что коэффициенты прохождения получены для волн, идущих сверху вниз и снизу вверх соответственно.

Если на верхнюю границу слоя положить лист металла (например, медную фольгу), то коэффициент отражения для такой границы будет равен минус 1. Это означает, что в антенну георадара попадет сигнал той же амплитуды, что и зондирующий, но имеющий обратную полярность. Если теперь, не сдвигая георадар, убрать лист металла, то антенна зафиксирует новое временное распределение сигнала, т.е. суперпозицию сигналов, отраженных не только от верхней границы, но и от внутренних структурных неоднородностей дорожной конструкции (в данном случае границ слоя). Основным смысл такой операции калибровки в том, что теперь можно осуществить «привязку» характеристик нового сложного сигнала (суперпозиции отражений) к некоторому опорному (более простому) сигналу, в качестве которого и был выбран сигнал, отраженный от листа металла.

Следующий шаг состоит в определении диэлектрической проницаемости верхнего слоя (ε_1). Для этого перепишем формулу (6) в виде:

$$\varepsilon_1 = \left(\sqrt{\varepsilon_0} \frac{1 + R_0}{1 - R_0} \right)^2. \quad (7)$$

Подчеркнем, что диэлектрическая проницаемость верхней среды (в данном случае воздуха) известна (для воздуха она равна 1). Знание диэлектрической проницаемости слоя позволяет определить коэффициент прохождения через верхнюю границу по формуле (6), а также вычислить набег фазы:

$\varphi_{1\pm} = e^{ik_1 h_1}$, где $k_1 = \left(\frac{\omega}{c} \right) \cdot \sqrt{\varepsilon_1}$ – волновое число первого слоя; c – скорость света; ω – частота сигнала.

Знание этих величин позволяет применить указанный алгоритм к следующей границе и вычислить диэлектрическую проницаемость нижнего слоя (в данном случае это бесконечно толстое основание).

Для определения толщины слоя h_1 необходимо на основании определенной экспериментально задержки Δt записать:

$$h_1 = \frac{(c \cdot \Delta t)}{2 \sqrt{\varepsilon_1(\omega)}}. \quad (8)$$

При наличии нескольких слоев указанную последовательность операций необходимо повторить. Подчеркнем, что данные формулы получены в предположении отсутствия потерь либо их малости.



Анализ формулы (8) показывает, что на точность определения свойств дорожных одежд существенное влияние будет оказывать точное знание диэлектрической проницаемости (вообще говоря, комплексной), а также ее дисперсионных свойств. Но получить простые аналитические формулы для определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости (дисперсии) материалов, используемых в дорожном строительстве, не представляется возможным ввиду их сложного композиционного состава. Однако, для определения диэлектрической проницаемости материала (например, асфальтобетона), состоящего из смеси различных компонентов, существуют несколько простых моделей. Эти модели описываются соответствующими аналитическими уравнениями [6]:

(9) - модель Нельсона :
$$n_e = v_1 n_1 + v_2 n_2 + v_3 n_3 + \dots + v_N n_N ;$$

(10) - модель Ландау:
$$\sqrt[3]{\varepsilon_e} = v_1 \sqrt[3]{\varepsilon_1} + v_2 \sqrt[3]{\varepsilon_2} + v_3 \sqrt[3]{\varepsilon_3} + \dots + v_N \sqrt[3]{\varepsilon_N} ;$$

(11) - модель Лихтенекера:
$$\ln \varepsilon_e = v_1 \ln \varepsilon_1 + v_2 \ln \varepsilon_2 + v_3 \ln \varepsilon_3 + \dots + v_N \ln \varepsilon_N ,$$

где $n_e = \sqrt{\varepsilon_e}$ – эквивалентный показатель преломления всей среды,

N – общее количество составляющих (включая воздух),

$v_1, v_2, \dots, v_N$ – объемная доля каждой составляющей ($v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_N = 1$).

Объемная доля каждого компонента может быть вычислена по формуле:

(12)
$$v_n = \frac{m_n}{d_n} \cdot \frac{100}{V_e} (\%),$$

где v_n, m_n, d_n – соответственно объемная доля, массовая доля, удельная плотность n – й компоненты;

V_e – общий объем образца.

Введем в рассмотрение эквивалентную диэлектрическую проницаемость материала с максимальной плотностью (без воздушных полостей) и обозначим ее через ε_m . Тогда формула (9) может быть переписана в виде:

(13)
$$n_e = k_a v_1 + v_m n_m ,$$

где v_1 – объемная доля пор (содержание воздуха);

v_m, n_m – объемная доля других компонент и их эффективный показатель преломления;

n_e – эффективный показатель преломления всего материала;

k_a – поправочный коэффициент, определяемый путем калибровки.

Далее определяем с помощью (7) ε_1 , т.е. эффективную диэлектрическую проницаемость верхнего слоя. Затем рассчитываем соответствующий эффективный показатель преломления $n_{1,e} = \sqrt{\varepsilon_1}$. В итоге теперь мы можем рассчитать объемную долю воздуха по формуле, следующей из (13):

(14)
$$v_1 = \frac{n_{1,e} - v_m n_m}{k_a} .$$

При этом предполагается, что значения величин v_m, n_m известны, т.е. получены на этапе предварительных измерений.

Калибровочные данные предлагается получать в лабораторных условиях следующим образом:



1. Изготавливается образец с максимальной плотностью, измеряются его объем V_m (толщина h_m) и масса P_m , определяется его плотность.

2. На поверхность приготовленного образца кладется тонкий лист металла и измеряется отраженный сигнал (и его амплитуда A_0), который фиксируется (запоминается) в программе обработки данных.

3. Лист металла убирается с поверхности и производится измерение отраженного от поверхности образца сигнала и его амплитуды A_1 . Все остальные параметры (в первую очередь положение антенны георадара относительно поверхности) должны оставаться неизменными. При этом желательно, чтобы образец имел значительную толщину, позволяющую разделить сигналы, отраженные от верхней и нижней границ образца. Глубина может (не обязательно) составлять 20 и более сантиметров. Отраженный сигнал также фиксируется в программе.

4. По формуле $R_{0,m} = \frac{A_1}{A_0}$ вычисляется коэффициент отражения и полученное значение

подставляется в формулу (7), которую теперь перепишем в виде $n_{1,m} = n_0 \frac{1 + R_0}{1 - R_0}$.

5. Далее из этого же материала готовится менее плотный образец и его параметрам приписываются индексы l . Затем для этого образца измеряются исходные параметры, в том числе и объемная доля воздуха $v'_{1,l}$. Повторяются этапы 2-4.

6. Этапы 1-5 повторяются для новых образцов с уменьшающейся плотностью. Данные заносятся в таблицу.

7. Производится обработка полученных результатов, состоящая в вычислении объемной доли воздуха в образцах по формуле (14), где поправочный коэффициент k_a полагается равным 1 и полученные результаты сравниваются с истинными значениями $v'_{1,l}$. На основании сравнения данных вычисляется значение поправочного коэффициента k_a .

Таким образом, предложенная методика позволяет оперативно определять как толщину слоев дорожной одежды, так и их плотность (пористость), что может быть использовано для определения текущего состояния (в частности, несущей способности) конструкции. Следовательно, эти данные необходимо учитывать при разработке алгоритмов назначения ремонтных мероприятий. В последующем предложенная процедура может быть развита для диагностики состояния всех слоев многослойных конструкций на основе методов решения обратных задач, рассмотренных в [7].

Литература

1. Diefenderer B. K., Apeagyei A. K. Analysis of Full-Depth Reclamation Trial Sections in Virginia. / B.K. Diefenderer, A.K. Apeagyei // Final Report VCTIR. – 2011. – 54 p.
2. Pologruto M. Procedure for Use of Falling Weight Deflectometer to Determine AASHTO Layer Coefficients. / M. Pologruto // Transportation Research Record 1764: [Transportation R.B.]. – Washington: D.C. – 2001.
3. Fauchard C. Influence of compaction on bituminous mixtures at microwaves frequencies. / C. Fauchard, Bo Li, E. Ferrari, L. Laguerre, X. Derobert et al. // NDTCE'09. Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes: France, June 30th – July 3rd. – 2009. – PP. 1-7.
4. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд. МГУ, 2005. – 153 с.
5. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. / M. Jol Harry. – Elsevier B.V., 2009. – 508 p.
6. Mardeni R.R. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system / R.R. Mardeni, S.A. Raja Abdullah, H.Z.M. Shafri // Progress In Electromagnetics Research. – Vol. 21. – 2010. – PP. 399-417.
7. Батракова А.Г. Определение плотности и влажности грунтов земляного полотна методами георадиолокации / А.Г. Батракова, Д.О. Батраков // Дороги і мости: Збірник наукових статей. – Київ: ДержНДІ ім. М.П. Шульгіна - 2006 – вип.. 5, с. 15-35



УДК 625.7/.8

Батракова А.Г., канд. техн. наук, Урдзик С.Н., Процюк В.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ И ИНФИЛЬТРАЦИИ В СЛОЯХ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Состояние и характеристики грунтов основания земляного полотна и несущих слоев конструкции играют важную роль в оценке несущей способности, как покрытия, так и всей конструкции дорожной одежды в целом. Только с привлечением этих данных можно сделать обоснованное заключение о текущем состоянии конструкции дорожной одежды и ее остаточном ресурсе. В то же время известно, что состояние и характеристики подстилающих грунтов и слоев конструкции существенным образом зависят от содержания влаги. Процедура принятия управленческих решений относительно мероприятий по обслуживанию и ремонту дорог во многом базируется на оценке несущей способности основания. Как известно, термин несущая способность подразумевает способность конструкции выдерживать определенное число приложений расчетной нагрузки. Следовательно, если оценка несущей способности основания (зависящей также и от влагосодержания) сделана неточно или не проводилась вовсе, то рекомендации по проведению мероприятий по обслуживанию и ремонту могут оказаться неверными, что приведет к значительным убыткам, либо излишним затратам.

В настоящее время наиболее распространенным средством оценки несущей способности является установка динамического нагружения, измеряющая «жесткость» (динамический модуль упругости) конструкции. Однако такая методика отражает лишь общий модуль упругости всей конструкции и не позволяет выяснить модули элементов конструкции и, тем более, причины которыми обусловлены именно такие значения их характеристик. В то же время известно, что увеличение содержания влаги в грунтах основания может привести к уменьшению модуля слоев [1], вызвав при этом больший прогиб при испытаниях. При этом существенно, что оценки прочности с помощью установки динамического нагружения основываются на данных единичных испытаний, моделирующих циклическую нагрузку. Следовательно, они должны быть дополнены соответствующими данными, позволяющими учесть изменение условий во времени (например, сезонные колебания влажности).

В этой связи представляется перспективным использование совместно с установками динамического нагружения также и георадаров для определения влажности в нижних слоях конструкции. В дальнейшем эти результаты полевых испытаний совместно с результатами лабораторных исследований связи влагосодержания в материалах конструкции с ее прочностными характеристиками могут послужить основой для получения более точных оценок несущей способности покрытия при изменяющихся условиях эксплуатации.

Другим направлением использования георадарных технологий является определение максимального сезонного (с вероятностью) содержания влаги. Эти данные могут способствовать повышению достоверности прогнозов сезонного изменения свойств дорожных конструкций. Кроме того, очевидно, что данные полевых обследований влажности нижних слоев могут быть использованы для назначения адекватных мероприятий по содержанию и ремонту покрытия. Результаты, полученные другими исследователями [2,3] свидетельствуют о том, что излишнее количество влаги в верхнем слое асфальтобетона и нижних слоях основания может быть причиной возникновения таких серьезных дефектов конструкции, как нарушение сцепления между слоями (расслоение) и отрыва верхних слоев. В таком случае технологии подповерхностного зондирования могут быть использованы для обнаружения и позиционирования участков повышенной влагопроницаемости с целью получения более надежного локального прогноза деградации конструкции на обследуемом участке дороги.

Оценка влажности нижних слоев конструкции также необходима для определения эффективности дренажных систем или обоснования рекомендаций по устройству дренажа. Несмотря на существенную капиталоемкость мероприятий по устройству дренажных систем, соответствующие проекты часто выполняются без достаточной информации о свойствах подстилающих грунтов. В результате оказывается, что дорогостоящие дренажные системы не приносят никакой пользы, в то время как использование затраченных на них средств на устройство дренажа на других участках могло бы существенно повысить долговечность последних. В таком случае георадарные технологии могли бы использоваться для выявления участков, где устройство дренажа может принести наибольшую пользу в смысле повышения надежности и долговечности конструкции. Это, в конечном итоге, обеспечит рациональное распределение затрат и материальных ресурсов.

Оценка влажности материалов, используемых в дорожном строительстве, в настоящее время проводится с использованием различных методов. К ним относятся: взвешивание образцов, временная



рефлектометрия, регистрация нейтронного прохождения (neutron probe logging), емкостные измерения либо измерения проводимости и родственный метод импедансной томографии. Эти методы являются дорогостоящими, трудоемкими и обладают значительными погрешностями, связанными в первую очередь с попаданием в образцы воды, применяемой для охлаждения инструментов, используемых при отборе кернов. Поэтому процедура определения влагосодержания в конструктивных слоях дорожных одежд до последнего времени не входила в набор мероприятий по обследованию дорог. Георадарные технологии, напротив, являются неразрушающими и позволяют осуществлять сбор и обработку данных в режиме реального времени с участков большой протяженности. Поэтому такие технологии относятся к весьма перспективным в плане применения в дорожной отрасли. Об этом свидетельствуют исследования по применению георадарных технологий для определения влагосодержания в дорожных конструкциях. В частности, в [4] использован анализ амплитуд сигналов для качественной оценки инфильтрации соленой воды сквозь покрытие автобана, авторы [5] использовали амплитудные данные для количественной оценки содержания воды в промежуточных слоях конструкции дорожной одежды в лабораторных условиях.

Среди методик оценки степени увлажнения слоев дорожных конструкций, основанных на определении диэлектрической проницаемости с последующим пересчетом ее распределения в распределение влажности можно выделить несколько групп. Из них основными являются две.

Методики первой группы основываются на анализе так называемых поверхностных волн. При решении задач гео зондирования такие волны принято называть «грунтовыми волнами» (ground waves) (рис.1). Смысл технологий такого типа состоит в анализе сигналов, распространяющихся вдоль поверхности дороги.

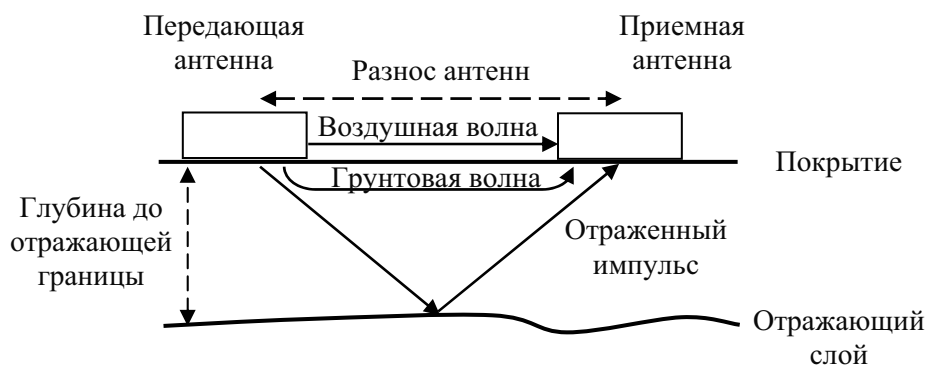


Рисунок 1 – Схема положения антенн радара и прохождения грунтовых, воздушных и отраженных волн

Методики второй группы основываются на анализе волн, прошедших через исследуемую структуру. При этом используют моно статические (приемо-передающие антенны) (рис.2).

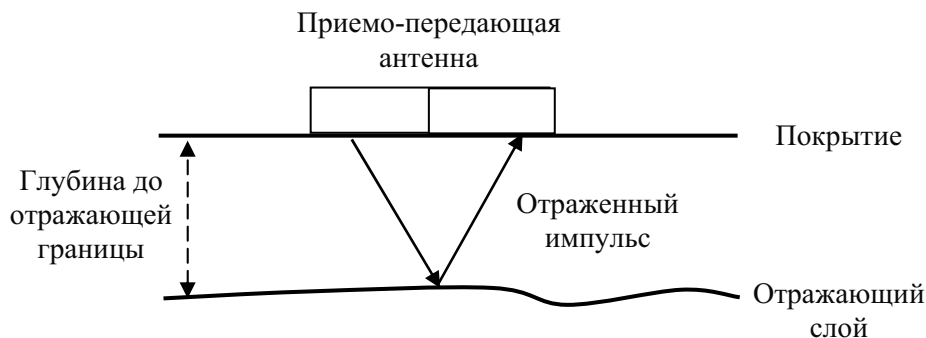


Рисунок 2 – Схема положения антенн радара и прохождения грунтовых, воздушных и отраженных волн

К настоящему времени разработаны методики обработки георадарных данных с целью построения распределения диэлектрической проницаемости по глубине исследуемой структуры [6], основанные на обработке голограммы дифрагированной волны. Дифрагированная волна на радараграмме отображается в виде гиперболы, описываемой уравнением [7]:



$$t(x) = \frac{2 \times L}{V} = \frac{2 \times \sqrt{x^2 + h^2}}{V},$$

(1)

де L – путь, пройденный волной, см;
 V – скорость распространения, см/нс;
 h – глубина залегания объекта, см.
 $t(x)$ – время прохождения волны до объекта.

При этом скорость распространения волны в среде пропорциональна значению угла наклона ветки гиперболического отражения на радарограмме – чем острее угол наклона, тем меньше скорость распространения волны в среде.

Вместе с тем, в настоящее время разработать строгие аналитические формулы для восстановления непрерывного профиля комплексной диэлектрической проницаемости дорожных одежд и грунтов земляного полотна с учетом их влагонасыщенности не представляется возможным в силу сложности задачи. Поэтому на данном этапе предлагается использовать для оценки влажности слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна лабораторную калибровку георадара применительно к конкретным материалам. Основу данной калибровки составляет определение связи диэлектрической проницаемости с влажностью.

Известно, что величина диэлектрической проницаемости (ϵ') и скорость распространения волн в грунтах (V) существенным образом зависят от их влажности (W). Значения диэлектрической проницаемости могут в одних случаях быть индикатором количества влаги в грунтах, а в других – количественного состава компонентов в исследуемой смеси.

Для материалов можно воспользоваться эмпирическими зависимостями:

а) для песков и суглинков [7]:

$$\epsilon' = 3,2 + 1,1 \times W,$$

(2)

где W – влажность грунта, доли единиц;

б) для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности от 3 % до 45 % [8]:

$$\epsilon' = 3,03 + 9,6 \times W_{об} + 146 \times W_{об}^2 - 76,7 \times W_{об}^3,$$

(3)

где $W_{об}$ – объемная влажность грунта, доли единиц,

$$W_{об} = \frac{W \times \gamma}{\gamma_с},$$

(4)

где γ – плотность сухого грунта, г/см³;

$\gamma_с$ – плотность воды, г/см³, $\gamma_с = 1$ г/см³.

Для сред с большой влажностью (свыше 45 %) [7]:

$$\epsilon' = \frac{720}{(180 - W)}.$$

(5)

Диэлектрическая проницаемость дискретных материалов зависит от фракции и плотности слоя.

Связь диэлектрической проницаемости с влажностью щебеночного слоя определялась экспериментальным путем. Для проведения экспериментальных исследований по определению диэлектрической проницаемости слоя щебня был использован щебень фракции 5-10 мм. Толщина исследуемого щебеночного слоя составляет 40 см. Влажность щебня определялась согласно ДСТУ Б В.2.1-17.

Для определения диэлектрической проницаемости слоя проводилось зондирование увлажненного щебня и различных типов грунтов с известными коэффициентом уплотнения. По результатам



интерпретации радарограм с помощью программы «Geovis» установлена величина диэлектрической проницаемости исследуемого материала слоя. График зависимости диэлектрической проницаемости слоя щебня и песчаного грунта от влажности приведен на рисунке 3.

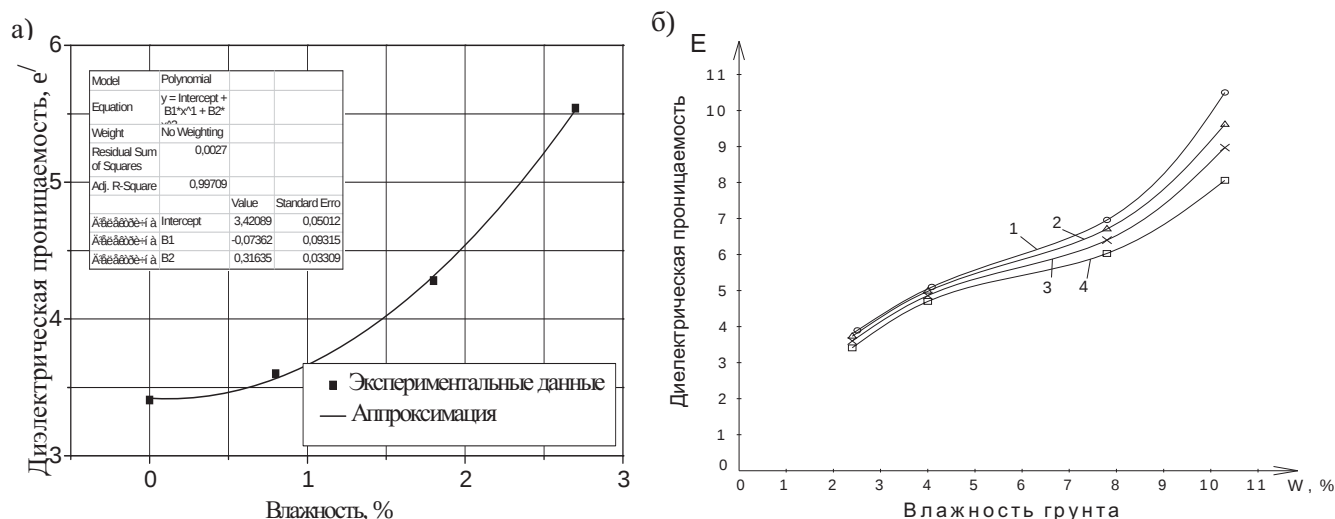


Рисунок 3 – Связь диэлектрической проницаемости с влажностью материалов:
а) слоя щебня; б) грунтов при различном коэффициенте уплотнения

Диэлектрическая проницаемость щебеночного слоя связана с влажностью соотношением:

$$\epsilon' = 3,4209 - 0,07362 \times W + 0,31635 \times W^2, \quad (6)$$

где W – влажность слоя, %.

Результаты проведенных лабораторных экспериментов могут быть использованы при георадарном обследовании автомобильных дорог на этапе эксплуатации. Примером может служить участок автомобильной дороги, находящийся в эксплуатации первый год после капитального ремонта, на котором была определена достаточно протяженная по длине просадка дорожной одежды.

На рисунке 4 представлены радарограммы, полученные по результатам георадарного обследования, и результаты обработки сигналов по исследуемому профилю. На радарограмме (рис. 4) достаточно четко определяются зоны повышенного увлажнения (им отвечают зоны затухания сигнала). На данных аномальных участках была определена влажность грунтов земляного полотна. Дальнейшее установление связи между влажностью и диэлектрической проницаемостью грунта позволило подтвердить правильность интерпретации радарограм.

По результатам георадарного сканирования и дальнейшего экспериментального определения влажности грунтов земляного полотна было установлено, что возможной причиной просадки покрытия на данном участке дороги является повышенное увлажнение грунтов земляного полотна. Это может приводить к снижению несущей способности подстилающегося грунта и, как следствие, просадке дорожной конструкции. Окончательный вывод по данному участку дороги можно сделать только после расчетов сдвигающих напряжений в конструкции дорожной одежды и грунтах земляного полотна.

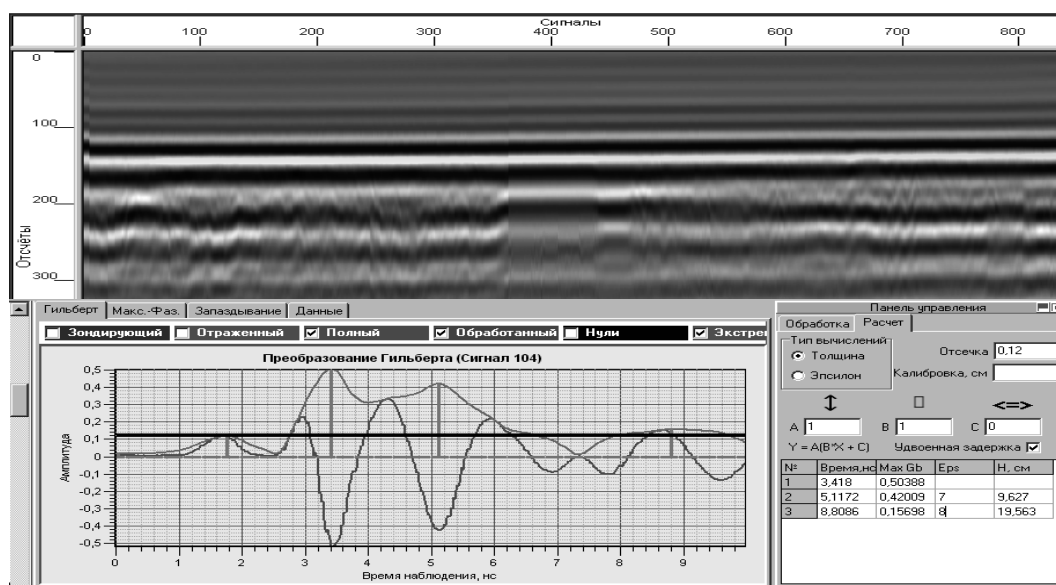


Рисунок 4 – Обследование дорожной одежды

Второй участок автомобильной дороги был выбран по критерию скорости развития деформаций и разрушений покрытия. По результатам визуального обследования и данными дефектных ведомостей системы управления состоянием покрытия (СУСП) на данной дороге выбирались участки, на которых мера поражения такими дефектами как колеиность, просадка, сетка трещин существенно образом возрастала из года в год.

Целью георадарного сканирования было установление возможных причин развития деформаций.

Зондирование участков велось в продольном и поперечном направлениях. В начале маршрута зондирования выполнялась калибровка георадарных данных с целью определения диэлектрической проницаемости слоев покрытия. Для идентификации подповерхностных дефектов, которые были установлены по результатам георадарного сканирования, проводился отбор кернов на исследуемом участке дороги.

Как свидетельствуют результаты георадарного сканирования поперечника на марке № 3 (рис. 5), в конструкции дорожной одежды наблюдается повышенная влажность слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна. Участкам повышенной влажности соответствуют зоны затухания сигналов.

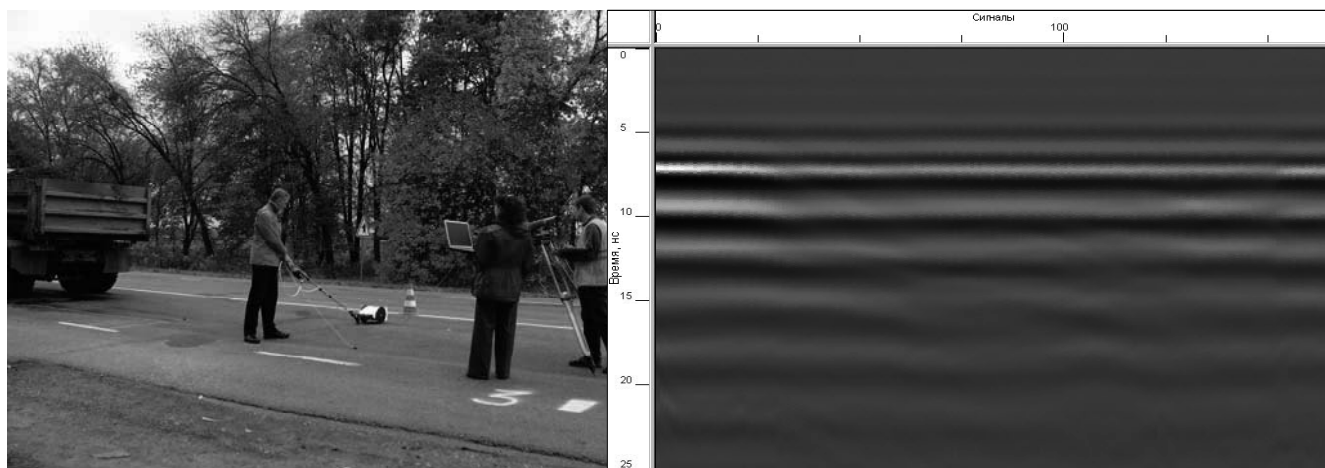


Рисунок 5 – Сканирование поперечного профиля на марке №3



Для подтверждения выводов, сделанных по результатам интерпретации радарограмм, на марке № 3 была определена влажность грунтов на обочине на глубине 50 см с помощью влагомера, а также проведен отбор кернов (рис. 6).



Рисунок 6 – Определение влажности грунтов на обочине на глубине 50 см; керны на марке № 3

По результатам отбора кернов определено, что слои основания переувлажнены, нижний слой асфальтобетонного покрытия поддается разборке вручную, что свидетельствует о существенном снижении прочностных характеристик материалов конструкции дорожной одежды.

Таким образом, георадарное обследование участка дороги на марке № 3 позволило сделать вывод, что первопричиной преждевременного разрушения конструкции дорожной одежды является необеспеченность водоотвода от земляного полотна. Это необходимо учитывать при планировании и назначении мероприятий по ремонту и содержанию данного участка дороги.

Вместе с тем, сопоставление значений влажности грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды, полученных путем оценки данных о времени прохождения электромагнитного импульса георадара и путем гравиметрических измерений, показали, что расхождение между этими двумя методами составляет приблизительно 3 %.

Эти результаты свидетельствуют, что методы подповерхностного зондирования могут использоваться для точной, неразрушающей оценки влажности слоев дорожной одежды, грунтов земляного полотна, а также оценки эффективности дренажных слоев.

Литература

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004 – [Чинний від 2005-01-01]. – К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2004. – 153 с. – (Стандарт Укравтодор).
2. Scullion T. Pavement evaluations using ground penetrating radar in Texas / T. Scullion, C.L. Lau, Y. Chen // Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, June 12-16, Kitchener, Ontario. – 1994. – Vol. 1 of 3. – PP. 449-463.
3. Maser K.R. Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar / K.R. Maser // J. Infrastruct. Syst. – 1996. – Vol. 2 (2). – PP. 94-101.
4. Saarenketo T. The use of ground penetrating radar for monitoring water movement in road structures / T. Saarenketo, T. Nikkinen, S. Lotvonen // Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, June 12-16, Kitchener, Ontario. – 1994. – Vol. 3. – PP. 1181-1192.
5. Scullion T. Colormap – user's Manual with Case Studies. / T. Scullion, Y. Chen, C.L. Lau – Texas: DOTPD [Rep. TX-95-1341-1]. – 1995.
6. Денисов Р. Р. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме / Р. Р. Денисов, В. В. Капустин // Геофизика. – 2010. – №4. – С. 76-80
7. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд. МГУ, 2005. – 153 с.



УДК 624.2.01

Бильченко А.В. канд. техн. наук, Кислов А.Г. канд. техн. наук

К РЕОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Анотація. Проаналізовано основні фактори, які впливають на стратегію експлуатації мостових споруд. Пропонується система збереження мостових споруд на досягнутому рівні пошкоджень.

Ключові слова: мостова споруда, стратегія експлуатації, система збереження.

Аннотация. Проанализированы основные факторы, которые влияют на стратегию эксплуатации мостовых сооружений. Предлагается система сохранения мостовых сооружений на достигнутом уровне повреждений.

Ключевые слова: мостовое сооружение, стратегия, эксплуатация, система сохранения.

Abstract. The main factors that have an impact on the strategy of bridge structures operation are analyzed. The system of bridge structures maintenance at the obtained level of damage is offered.

Key words: bridge, structure, operating strategy, maintenance system.

В настоящее время мостовые сооружения в Украине брошены на самовыживание.

Анализ фактического состояния мостовых сооружений позволил заметить тенденции его значительного ухудшения в последние годы, поэтому требуется разработка путей совершенствования системы эксплуатации, диагностики и системы управления эксплуатацией.

Прежде всего, эта система должна быть увязана с концепцией развития автотранспортного комплекса, а также влиять на эксплуатацию мостовых сооружений через гибкое финансирование и контроль качества выполняемых работ (в том числе и контроль использования отпущенных средств, так как это бюджетные деньги). Это требование означает, что вначале надо иметь постоянно действующую Систему эксплуатации, а затем решать задачи управления всеми компонентами этой системы.

Правильная эксплуатация объекта предусматривает выполнение работ, относящихся, в первую очередь, к содержанию, профилактике и планово-предупредительным ремонтам, а затем выполнение капитальных ремонтов или реконструкции. Такая постановка может быть выполнена при различных стратегиях эксплуатации. Схемы затрат должны соответствовать стратегиям эксплуатации – от так называемой «нулевой стратегии» - ничего не делаем, то есть не вкладываем средства в сооружение для поддержания его нормального состояния после строительства, до стратегии, предусматривающей полное использование всей номенклатуры необходимых работ в особенности на первых двух эксплуатационных этапах. Наиболее распространенная в нашей стране – первая стратегия, когда на протяжении десятилетий мы ничего не делаем, то есть мостовые сооружения просто «бросаются» на нулевую эксплуатацию. В настоящее время мостовые сооружения эксплуатируются на основании следующей концепции «пока конструкция имеет достаточную прочность, ее ремонтировать не следует». И не смотря на то, что в ДБН В.2.3-14:2006 [1] заложен ремонт асфальтобетонного покрытия через 7 лет, а гидроизоляции через 15 лет, в лучшем случае, осуществляется ремонт только покрытия, а ремонт гидроизоляции откладывается до выполнения капитального ремонта мостового сооружения в целом, возможно через 40-50 лет. А ведь поврежденная гидроизоляция, это рана на сложной системе мостового сооружения, через которую и проникают все негативные воздействия, вследствие чего и происходят повреждения пролетных строений.

На основании этого в начале эксплуатации сооружения необходимо максимальное внимание уделять трем составляющим проезжей части: покрытию, водоотведению и гидроизоляции. В таблицах эксплуатационных состояний, приведенных в ДСТУ-НБВ.2.3-23:2009 [2], ремонт гидроизоляции относится к капитальному ремонту сооружения, то есть к четвертому эксплуатационному состоянию. Поэтому сохранить функциональные свойства сооружения на ранних стадиях эксплуатации невозможно.

Следовательно, предлагается стратегия эксплуатации мостовых сооружений, основанная на концепции «пока сооружение не начало разрушаться, необходимо защитить его от повреждений».

Анализ затрат по различным стратегиям эксплуатации мостового сооружения на примере железобетонных пролетных строений показывает, что от объема и вида затрат можно прийти к различным показателям технического состояния и срока службы. Например, уменьшение интервалов между профилактическими работами отодвигает срок выполнения ремонтных работ, тем самым достигается увеличение функциональных свойств сооружения и продлевается их общий срок службы. Так же увеличивает функционирование и своевременное выполнение планово-предупредительных ремонтов,



затраты на которые выше затрат по уходу и профилактику, но значительно ниже затрат на ремонт. Планово-предупредительные работы в основном относятся к замене гидроизоляции. Наибольший срок службы при наименьших затратах дают те стратегии эксплуатации, которые не предусматривают работы по капитальному ремонту.

Стратегия эксплуатации «без капитального ремонта» то есть без существенных капитальных затрат, является целью будущего, к которому мы сегодня не готовы из-за большого числа сооружений с «накопленным недоремонтом». В настоящее время мы находимся на переходном этапе (промежуточном) от плохого состояния мостового хозяйства к улучшенному состоянию. На этом переходном этапе очень важно постоянно вести надзор и мониторинг состояния сооружения и своевременно проводить необходимые планово-предупредительные ремонты проезжей части, водоотведения и гидроизоляции в достаточном объеме. В этом принципе «своевременности» и «достаточности» заключается суть стратегии в предлагаемой Системе эксплуатации по сохранению мостовых сооружений. Поэтому на сооружениях, которые не находятся в аварийном состоянии, и учитывая ограниченное финансирование, необходимо начинать спасение их несущих конструкций. Следует отметить, что 80% мостовых сооружений Украины находятся в эксплуатационных состояниях 2 и 3 [3] на которых можно применить стратегию сохранения.

Для реализации предложенного необходима программа по всеобщему ремонту гидроизоляции, водоотведения и деформационных швов, применение которой позволит увеличить остаточный ресурс и уменьшит затраты на капитальный ремонт.

Ремонт дорожными организациями асфальтобетонного покрытия проезжей части, который выполняется через 15 лет и позже, без ремонта гидроизоляции, не оказывают улучшающего воздействия на состояние мостового сооружения. Это выброшенные деньги, сооружение продолжает разрушаться.

При анализе надежности как показателя безопасности функционирования мостовых сооружений возникает мера нашей неуверенности в сопротивлении конструкций и изменении физико-механических характеристик материалов, которые применяются для возведения сооружения. Здесь необходимо учитывать параметры, учитывающие человеческий фактор при проектировании и строительстве, следовательно необходимо ввести коэффициент учитывающий риск. Анализу поддаются две группы параметров базовых переменных введенных в работах [4, 5]:

- переменные, которые характеризуют сопротивление элементов - параметры физико-механические, химические, теплофизические, геометрические, коэффициенты сцепления и условий работы.
- переменные, которые характеризуют нагрузки элементов, вызванные постоянными и временными нагрузками и перемещениями, долговременными процессами в материалах параметрами динамических сил.

Четкое разделение переменных на группы при длительной эксплуатации не всегда возможно, так как при анализе надежности не учитывается фактор того, что нерасчетные элементы моста, например гидроизоляция и водоотведение, очень сильно влияют на первую группу случайных базовых переменных, изложенных выше.

Поэтому необходимо ввести третью группу случайных базовых переменных:

- переменные, которые характеризуют защитные свойства нерасчетных элементов моста, от которых зависит деградация несущих элементов, то есть первая группа. Эта группа имеет особенное значение при изменении стратегии развития мостовых сооружений «от планирования ремонтов к планированию сохранения».

Предлагаемая система эксплуатации, направленная на сохранение мостовых сооружений предполагает в мостовых организациях по эксплуатации мостовых сооружений организацию службы мониторинга, которая могла бы дать ответы хотя бы на основании экспертной системы на следующие вопросы

1. Как интенсивно развиваются дефекты, связанные с выходом из строя гидроизоляции и деформационных швов?
2. На какой год планировать ремонт?
3. Сколько лет мостовое сооружение может функционировать после ремонта?

Существующая структура управления эксплуатацией мостовыми сооружениями, которая находится в системе эксплуатации автомобильных дорог, не дает шансов для нормальной их эксплуатации. Дорожные организации из всего объема финансирования строительных работ на эксплуатацию мостов выделяют всего 4%. Это и предопределяет катастрофическую ситуацию с мостами, т.е. они брошены, ведь 95% времени дорожники заняты дорогами. Анализ показывает, что иерархичная линейно-функциональная система управления в дорожных организациях имеет ограниченную номенклатуру услуг, постоянно повторяющихся одних и тех же работ. Стабильность внешней среды для обеспечения функциональных задач при эксплуатации дорог требуют стандартных управленческих решений. Поэтому, если дорожной организации увеличить номенклатуру услуг, оказываемых в виде эксплуатации мостов, с увеличенными требованиями к их профессионализму по мостам, которые выходят за рамки стандартных управленческих задач по



эксплуатации дорог, то линейно-функциональная структура не срабатывает. Дорожник решает главную задачу – эксплуатация дороги, а мосты – как получится, тем более отдельного финансирования нет. Поэтому сегодня нужна государственная программа по выводу эксплуатации мостовых сооружений из управления дорожных организаций или хотя бы автономное функционирование в составе организаций по эксплуатации автомобильных дорог.

Анализируя состояние организационной и финансовой потребности мостового сектора дорожной отрасли можно сделать следующие основные выводы [6]:

1. Продление долговечности мостовых сооружений требует незначительного увеличения средств на эксплуатацию функциональных этапов (уход и ремонт гидроизоляции, водоотвода и деформационных швов), при этом появляется возможность существенного сокращения числа мостов, требующих перестройки, реконструкции и капитального ремонта, что позволит увеличить их остаточный ресурс.

2. Социальный и экономический ущерб, в последнее время растет в связи с наличием на сети автомобильных дорог определенного процента мостовых сооружений, состояние которых не соответствует предъявляемым к ним функциональным требованиям.

3. Создание уникальных моделей управления процессами поточного ремонта и эксплуатационного содержания мостовых сооружений приведет к продлению срока их службы и значительному экономическому эффекту.

Литература

1. ДБН В.2.3-14:2006 Мости та труби. Правила проектування. [Текст].-К.2006.
2. ДСТУ-НБ В.2.3-23:2009 Настанови з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. [Текст].-К.2009.
3. Лантух-Лященко А.І. Аналітична експертна система управління мостами. Досвід впровадження, Дорожня галузь України №5/ Лантух-Лященко А.І., Канін А.П., Бондар Л.П., Коваль П.М., Фаль А.Є./ Київ, 2011.
4. Лантух-Лященко А.І. Проблеми створення національної системи експлуатації мостів.//36. Доповідей «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення» - К.:1998.- С.138-145.
5. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. Вісник Транспортної Академії України, №3, Київ1999.- С.59-63.
6. Бильченко А.В. Концепция сохранения и развития мостовых сооружений в г. Харькове до 2012г. [Текст]/А.В.Бильченко, А.Г.Кислов, Е.А.Бадаева. – Харьков, 2008. – 39с.



Вирожемський В.К., к.т.н. перший заст.директора, **Юрченко В.О.**, д.т.н, проф., **Бригада О.В.**, ас.,
Коротченко М.В., зав. відділу.

ПРОБЛЕМА ЗАБРУДНЕННЯ ПРИДОРОЖНЬОГО ПРОСТОРУ ТА СХЕМИ ВІДВЕДЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ З АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ І ШТУЧНИХ СПОРУД

Негативний вплив на навколишнє природне середовище є неминучим наслідком існування та діяльності людини, при цьому рівень антропогенного навантаження частіше перевищує природні можливості біологічного самоочищення екологічних систем.

В процесі будівництва та експлуатації автомобільних доріг відбувається порушення екологічного балансу та постійне збільшення техногенного навантаження на природне середовище.

Поверхневий стік з автомобільних доріг уявляє собою значні об'єми забруднених вод, які частіше за все без очищення, зі значеннями гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин, що перевищують норму у декілька разів, потрапляють до водних об'єктів та на прилеглу територію, що суперечить природоохоронним вимогам.

На вміст забруднюючих речовин у стічних водах з автомобільних доріг впливає інтенсивність транспортного потоку, інтенсивність дощу, тривалість попереднього бездощового періоду, частота прибирання сміття та інші фактори [1].

Найбільш значимими джерелами забруднення стічних вод з автомобільних доріг є:

1. Змиви з дорожнього полотна.
2. Змиви з поверхні автомобілів [2].
3. Конденсація газоподібних викидів автомобілів.
4. Випадкові процеси (розливи, аварії, втрати вантажів, що транспортуються тощо)

Показниками забрудненості поверхневих стічних вод, які найбільш використовуються в дослідженнях та нормативних документах, є концентрація завислих речовин та нафтопродуктів. Найбільшу небезпеку при потрапінні стічних вод з покриття автомобільних доріг на територію вздовж автомобільної дороги і у водойми представляють нафтопродукти, до складу яких входять бензол, стирол, толуол, ксилол тощо. Середній вміст завислих речовин у дощових стічних водах приймають від 1 до 2 г/дм³.

Найбільших концентрацій забруднення стоки досягаються в перші 10-30 хвилин від початку дощу (що приблизно збігається з піковою інтенсивністю дощу). При чому концентрація зважених речовин є максимальною в початковий період дощу, потім поступово знижується, а в кінці дощу концентрації цього забруднення можуть знову зростати. Концентрація нафтопродуктів також максимальна в початковий період дощу, а потім поступово знижується до малих значень і залишається постійною практично протягом усього періоду випадання дощу.

Проблемою забруднення талих вод є протиожезедні заходи. Внесення на поверхню дороги солей хлористого натрію, хлориду кальцію призводить до забруднення снігу, а при його таненні до забруднення поверхневих талих води та ґрунтів вздовж автомобільної дороги. Забруднення ґрунтів призводить до загибелі придорожньої рослинності і захисних лісонасаджень.

Однією з основних задач підвищення технічного рівня автомобільних доріг, безпечного руху і екологічності їх експлуатації є забезпечення своєчасного і цілеспрямованого збирання та відведення стічної води з поверхні автомобільних доріг з подальшим очищенням її від забруднень.

Існуючі в нашій країні системи поверхневого водовідводу найчастіше непрацездатні і не відповідають вимогам нормативних документів.

При відсутності або непрацездатності системи водовідведення стічних вод з поверхні автомобільних доріг призводить до зниження міцності дорожнього одягу, порушенню стійкості земляного полотна, скороченню міжремонтних термінів автомобільних доріг і штучних споруд, зниженню рівня безпеки і зручності руху транспортних засобів і забрудненню навколишнього середовища.

Екологічну безпеку природних систем і зниження негативного впливу автомобільних доріг на навколишнє середовище можна забезпечити тільки в результаті взаємодії різних заходів, а саме: своєчасного збору і відведення забрудненого стоку з поверхні автомобільної дороги і мостового полотна на очисні споруди; захисту укосів земляного полотна і схилів території, що прилягає, від ерозії; виключення забруднення поверхневими стоками водойм і підземних вод тощо.

Наукове обґрунтування різних систем організації відводу води з поверхні автомобільних доріг є невід'ємною частиною їх удосконалення. На підставі цієї вимоги проведений аналіз результатів досліджень і систематизація принципових схем дорожнього водовідводу й очищення стічних вод з точки зору їх



доцільності та використання для різних кліматичних і геолого-гідрологічних умов та на замовлення Укравтодору Державним підприємством "Державний дорожній науково-дослідний інститут ім.М.П.Шульгіна та ХНАДУ були розроблені Рекомендації з вибору та застосування технологічних схем відведення та очищення стоків з поверхні автомобільних доріг і штучних споруд.

Рекомендації встановлюють критерії вибору та застосування технологічних схем відведення та очищення стоків з поверхні автомобільних доріг і штучних споруд відповідно до вимог ДБН В.2.3-4, ДБН В.2.3-22, а також спрямовані на:

- зменшення негативного впливу стічних вод на навколишнє середовище;
- виконання нормативних вимог до матеріалів і конструкцій систем відведення та очищення поверхневих стоків з автомобільних доріг та штучних споруд;
- підвищення надійності експлуатації автомобільних доріг та штучних споруд, а також безпеки руху на них;
- забезпечення мінімізації забруднення поверхневих стоків при будівництві, ремонті та експлуатаційному утриманні автомобільних доріг.

Дані Рекомендації розроблені для організацій і спеціалістів, які займаються проектуванням, будівництвом і утриманням систем відведення та очищення поверхневих стоків на автомобільних дорогах загального користування.

Загальними положеннями Рекомендацій зазначено:

1. при проектуванні очисних споруд поверхневого водовідведення необхідно керуватися вимогами законодавчо-правових актів та нормативних документів, у тому числі ДБН 360, ДБН В.2.3-4, ДБН В.2.3-22, ДБН В.2.3-16, ДСП 173, СНиП 2.04.03, ВБН В.2.3-218-007;

2. вибір схеми водовідведення і очищення поверхневого стоку визначається якісною та кількісною характеристикою стоку, необхідним ступенем очищення і здійснюється на основі техніко-економічного порівняння варіантів і оцінки технічної можливості їх реалізації;

3. неорганізованість відведення поверхневого стоку з автомобільних доріг негативно впливає на транспортно-експлуатаційні характеристики автомобільних доріг, що призводить до зниження міцності дорожніх одягів, порушення стійкості земляного полотна, скорочення міжремонтних термінів служби автомобільних доріг, зниження рівня безпеки і зручності руху транспортних засобів, забруднення навколишнього середовища;

4. поверхневі стоки з автомобільних доріг містять органічні та неорганічні забруднюючі речовини різної дисперсності, концентрація яких вище ніж аналогічні показники для поверхневих стоків з сільськогосподарських територій та перевищують встановлені гранично допустимі концентрації згідно СанПиН 4630. Враховуючи токсичність та концентрації в стоках забруднюючих речовин, найбільшу екологічну небезпеку для природних об'єктів (територій, які прилягають до автомобільних доріг і природних водойм) створюють: нафтопродукти, в тому числі ароматичні вуглеводні, галогенорганічні сполуки, завислі речовини, біогенні елементи, важкі метали. В особливій небезпеці від впливу стоків з автомобільних доріг знаходяться об'єкти гідросфери.

В Розділі 6 Рекомендацій для проведення оцінки забруднення поверхневого стоку (скиду) з автомобільних доріг і необхідності очищення поверхневих стічних вод представлений розрахунок гранично допустимого скиду речовин у водний об'єкт та рекомендації щодо проведення цього розрахунку. Якщо проведені розрахунки ГДС показали необхідність очищення поверхневих стоків перед їх скидом у водотік, рекомендується влаштування відведення поверхневих стоків з покриття автомобільних доріг з подальшим очищенням їх на очисних спорудах.

Для запобігання забруднення довкілля поверхневими стоками з автомобільних доріг у випадку неможливості регулювання їх надходжень від джерел виникнення, необхідно забезпечити зниження концентрацій тих видів забруднень в поверхневих стоках, які перевищують значення гранично-допустимих концентрацій. Це досягається за рахунок відводу поверхневих стоків з автомобільних доріг на очисні споруди, які влаштовуються в місцях пониження рельєфу згідно з СНиП 2.04.03 та СН 496.

При влаштуванні очисних споруд необхідно:

- скид стоку у водоймища та водотоки здійснювати за погодженням з організаціями санітарного нагляду та установ Рибнагляду в спеціально відведених місцях, за умов дотримання встановленого гранично допустимого скиду;

- у разі неможливості повного забезпечення гранично допустимого скиду, що розраховується відповідно до ДСТУ 3013, [3], [4], [5] належить передбачати очищення стічних вод у місцевих каналізаційних системах або спеціальних відстійниках. Ступінь необхідного очищення, знешкодження та знезараження стічних вод в очисних спорудах встановлюється санітарно-технічним розрахунком і повинен відповідати Постанові Кабінету Міністрів України від 25 березня 1999 р. № 465 та СанПиН 4630 з врахуванням коефіцієнтів розбавлення і самоочищення;



- при скиді поверхневого стоку в систему міської каналізації забезпечити вимоги скиду, які регламентуються [6];

- у дорожньо-кліматичній зоні України У-ІІІ згідно з 7.2 ДБН В.2.3-4 використовувати випарне знешкодження забруднених стічних вод. Для цього їх направляють у випарні ставки або басейни, призначені для видалення рідкої фази випаровуванням. В якості випарних басейнів допускається використовувати місцеві пониження, резерви завглибшки не більше ніж 0,4 м.

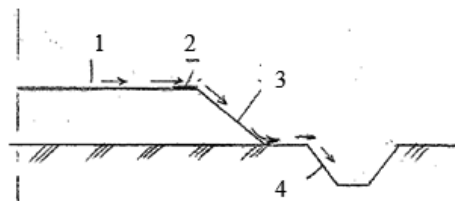
В Розділі 8 Рекомендацій щодо мінімізації забруднення довкілля поверхневими стоками при проектуванні автомобільних доріг рекомендується:

- віддавати перевагу тим проектним рішенням, які забезпечують відсутність перетину автомобільної дороги з водоохоронними зонами, а у випадку, якщо це неможливо або недоцільно, рекомендується відмовлятися від влаштування на цих ділянках майданчиків для стоянки та технічного обслуговування автомобілів і обов'язково передбачати будівництво ізольованої системи водовідведення з очисними спорудами. Для водовідведення рекомендується влаштовувати канали, лотки, швидкоотоки, випарні басейни, дощоприймальні колодязі тощо. Типи дощеприймальних колодязів рекомендується визначати згідно з ДСТУ Б.В.2.5-26;

- при перетині автомобільною дорогою з очікуваною інтенсивністю руху більше ніж 800 автомобілів за добу водоохоронних зон, об'єктів природно-заповідного фонду, зон санітарної охорони та рекреаційних зон рекомендується передбачити організований збір і відведення стоку з проїзної частини доріг, шляхопроводів і мостів, стоянок автотранспорту, майданчиків для відпочинку згідно з ВБН В.2.3-218-007. В цьому випадку потрібно застосовувати поперечний профіль з бортовим каменем і закритою системою водовідведення або з відкритою, у вигляді лотків, що розміщуються вздовж земляного полотна;

- у межах населених пунктів з очікуваною інтенсивністю руху більше ніж 1500 авт/добу рекомендується передбачити організований збір і відведення стоку з проїзної частини доріг, шляхопроводів, мостів, стоянок автотранспорту, АЗС та майданчиків для відпочинку відповідно до ВБН В.2.3-218-007. В цих умовах застосовується поперечний профіль з бортовим каменем і закритою системою водовідведення.

Відведення поверхневого стоку з проїзної частини автомобільних доріг згідно Рекомендацій проводиться по узбіччях і укосах земляного полотна у водовідвідні канали і резерви за різними схемами водовідведення [7]. На рисунку 1 наведена схема водовідведення, що характеризується вільним стіканням води по поверхні проїзної частини автомобільної дороги на узбіччя, далі на укоси й потім у водовідвідні канали.



1 – автомобільна дорога; 2 – узбіччя; 3 – укоси; 4 – водовідвідні канали

Рисунок 1 - Схема організації поверхневого водовідведення з поверхні автомобільної дороги на узбіччя

Швидкість стікання поверхневого стоку повинна визначатися параметрами поздовжніх і поперечних похилів проїзної частини та узбіч, згідно з ДБН В.2.3-4, станом покриття проїзної частини, а також його типом. Таку схему водовідведення можна рекомендувати застосовувати на автомобільних дорогах ІІІ-ІV категорій, які характеризуються більш низькою концентрацією забруднюючих речовин.

Для уникнення проникання води в конструктивні шари дорожнього одягу необхідно забезпечити своєчасне відведення води з поверхні узбіч. Це досягається улаштуванням поперечного похилу узбіч згідно з 7.1 ДБН В.2.3-4.

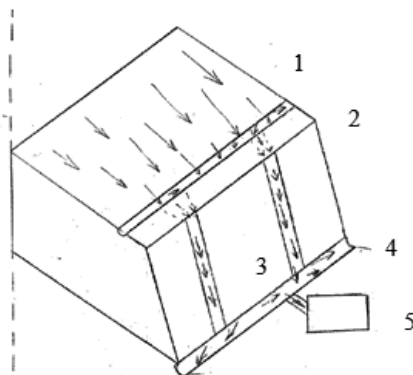
Обсяг фільтрації води в шари дорожнього одягу залежить не тільки від ширини і похилу узбіччя, але також від кількості зливових опадів у районі прокладання автомобільної дороги та фільтраційної здатності матеріалів укріплення узбіч.

Для захисту укосів від руйнування проводиться їх укріплення засівом трав, за допомогою мінеральних та органічних в'язучих, збірними бетонними конструкціями, габіонами, конструкціями із застосуванням геосинтетики тощо.



Поверхневі стоки від підшви насипів слід відводити за допомогою поздовжніх і поперечних водовідвідних каналів.

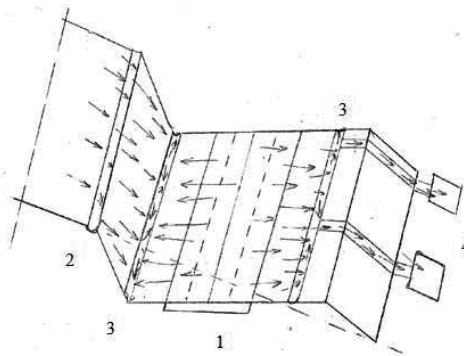
Схема водовідведення (рис. 2) характеризується вільним стіканням води по поверхні проїзної частини автомобільної дороги до прикрайкових водовідвідних (водозбірних) лотків, розташованих по обидва боки проїзної частини, далі у відкриті укісні водовідвідні (водоскидні) лотки, встановлені через певні відстані один від одного, потім у водовідвідні укріплені канали та на очисні споруди. Ця схема водовідведення може бути рекомендована на автомобільних дорогах I-III категорій, іноді IV категорії.



1 – проїзна частина автомобільної дороги; 2 - прикрайковий водовідвідний (водозбірний) лоток; 3 - відкриті укісні водовідвідні (водоскидні) лотки; 4 - водовідвідні укріплені канали; 5 – очисна споруда

Рисунок 2 - Схема організації водовідведення з поверхні автомобільної дороги до прикрайкових водовідвідних (водозбірних) лотків

Відведення поверхневих стоків з укосів виїмок і напіввиїмок, що прилягають до напівнасипів, здійснюється системами, які відводять поверхневі стоки до очисних споруд (випарні басейни, дощоприймальні колодязі тощо) (рис. 3).



1 – проїзна частина автомобільної дороги; 2 – нагірна канава; 3 – водовідвідні лотки; 4 – очисна споруда

Рисунок 3 - Схема відведення поверхневих стоків з укосів виїмок і напіввиїмок, що прилягають до напівнасипів

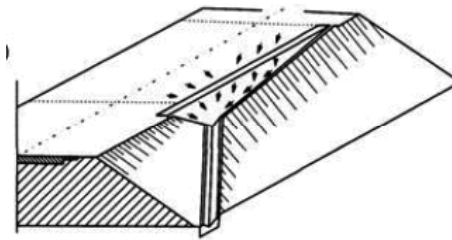
Випуск води з водовідвідних каналів, лотків в понижені місця рельєфу місцевості допускається за умови, що це не викличе заболочування місцевості і застою води біля земляного полотна. В разі перетину водовідвідними спорудами території, де інфільтрація поверхневого стоку в ґрунт погрожує стійкості укосів виїмок, основи земляного полотна, водовідвідні канали, лотки і резерви рекомендується влаштовувати з відповідною гідроізоляцією, а поверхню шару гідроізоляції укріплювати від розмиву і руйнування з урахуванням гідрравлічних характеристик потоку.

Укріплення дна водовідвідних каналів рекомендується робити щебенем, укріплення укосів - засівом трав на них, збірними бетонними плитами, збірними лотками, торкретбетоном, монолітним бетоном, бетонними сегментами, асфальтобетонними плитами і піщаним асфальтобетоном [4].

Різновидом схеми, яка наведена на рисунку 1, є схема з влаштуванням укісних лотків (рис. 4), яка включає побудову цементобетонних бERM, водозливів перемінного перетину. На затяжних ділянках з постійним поздовжнім похилом рекомендується влаштування водозливу з розширеним поперечним



перерізом і відкритим лотком трикутного поперечного перерізу, що розташований на укосі під кутом. При цьому укоси насипу укріплюються засівом трав.

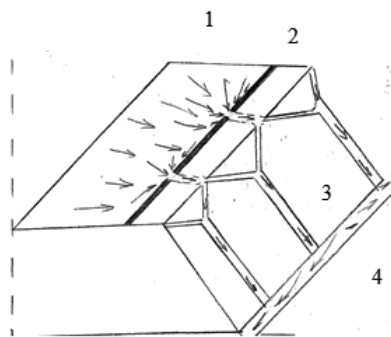


Розміри наведені в міліметрах

1 – проїзна частина автомобільної дороги; 2 – водозлив з розширеним поперечним перерізом і відкритим лотком трикутного поперечного перерізу

Рисунок 4 - Схема поверхневого водовідведення з влаштуванням укісних лотків трикутного перетину на автомобільній дорозі I категорії

Відповідно до схеми (рис. 5) поверхневі стоки з покриття акумулюються в передбордюрному просторі, що утворюється на стику крайки проїзної частини та бордюрного каменю, які знаходяться по обидві сторони проїзної частини, далі поступають у відкриті укісні водовідвідні (водозбірні) лотки, потім у водовідвідні русла, очисні споруди, закриту каналізацію або на очисні споруди. Така схема водовідведення рекомендується для влаштування на автомобільних дорогах I-II категорії, мостах та шляхопроводах [8].



1 – проїзна частина автомобільної дороги; 2 - бордюрий камінь; 3 - відкриті укісні водовідвідні (водозбірні) лотки;
4 - водовідвідні русла

Рисунок 5 - Схема організації поверхневого водовідведення з покриття автомобільної дороги в передбордюрний простір

Схема водовідведення, що рекомендується застосовувати на мостах і шляхопроводах з кількістю смуг руху менше ніж 6, передбачає збір поверхневих стоків вздовж тротуарів з наступним скиданням в лотки на мостових конусах або закриту зливу каналізацію. Схема водовідведення на мостах та шляхопроводах з кількістю смуг руху більше ніж 6, включає схему відведення води за допомогою поперечних випусків через водовідвідні трубки та тротуарні блоки під міст чи шляхопровід, або через дощоприймальні колодязі з подальшим скиданням до очисної споруди.

Відведення стічної води з розділювальної смуги дороги I категорії рекомендується здійснювати за рахунок поперечних та поздовжніх похилів згідно з 7.9 ДБН В. 2.3-4. Організоване відведення поверхневих стоків з розділювальної смуги рекомендується забезпечувати за допомогою дощеприймальних колодязів та водостічних труб під насипом дороги. Поверхневі стоки з розділювальної смуги шириною більше ніж 5 м допускається відводити в дощеприймальні колодязі по бетонним лоткам, що розташовані посередині розділювальної смуги, бетонній крайовій плиті, яка зв'язана з бордюром.

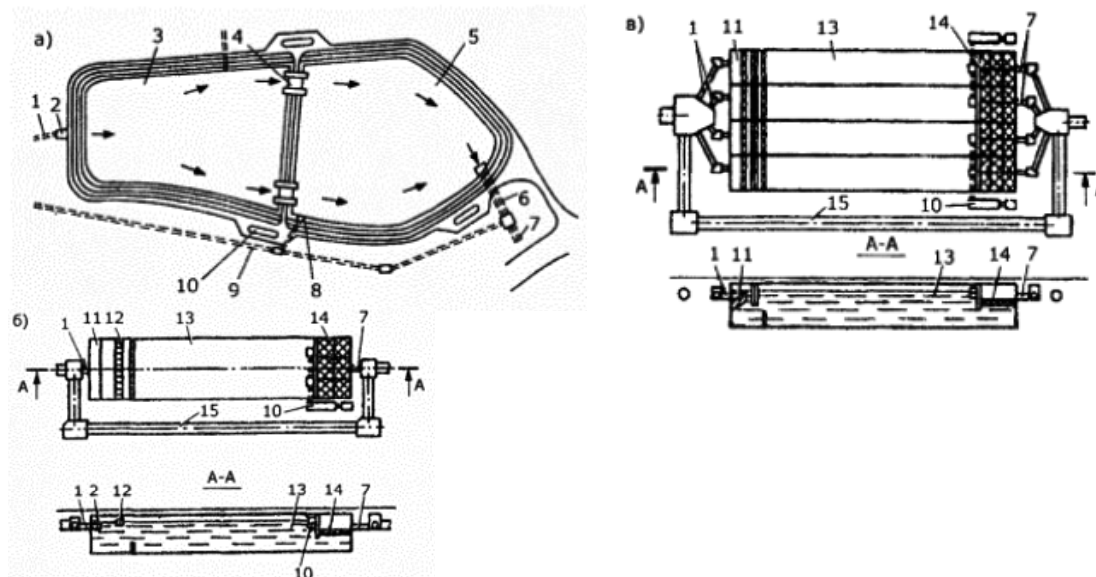
На ділянках віражів з розділювальною смугою поверхневі стоки із прилеглих до неї прикрайкових лотків скидаються в дощоприймальні колодязі та відводяться на очисні споруди [9].

На мостових переходах, що перетинають великі водойми, збирання води з покриття рекомендується здійснювати в типові лотки, що примикають із зовнішньої сторони до бордюрного блоку.

Щодо очищення поверхневих стічних вод в Розділі 10 Рекомендацій зазначено, що основні технологічні та конструктивні розрахунки очисних споруд проводять згідно з СНиП 2.04.03, [7] та [10].



Для очищення стічних вод за певний проміжок часу (більше ніж за добу), протягом якого окремі забруднюючі речовини випадають в осад рекомендується використовувати відстійники або акумулюючі резервуари, які влаштовуються як самостійні споруди (рис. 6).



Розміри наведені в міліметрах

а - ставок-відстійник довільної форми; б - однокамерний відстійник; в - багатокамерний відстійник
1 - підвідний колектор; 2 - вхід в першу секцію; 3 - перша секція; 4 - водоскид; 5 - друга секція; 6 - вихід з другої секції;
7 - водовідвідний колектор; 8, 11 - вхід в другу секцію; 9, 15 - обгінний колектор; 10 - маслоскофоуловачі;
12 - сміттєзатримуючі решітки; 13 - відстійна частина; 14 - фільтри доочищення

Рисунок 6 – Схеми відстоювання для очищення поверхневого стоку з автомобільної дороги

На автомобільних дорогах I-II категорій споруду очищення, з обмеженим накопичувачем, в якому осідають деякі частки, найкраще будувати глибиною менш ніж 2 м для рівномірного розподілу потоку, щоб уникнути підняття осаду через турбулентність. Ці ємності повинні бути непроникні для водоносних горизонтів. Накопичувач може бути оснащений вертикальним бар'єром, для того, щоб рідини, що знаходяться на поверхні води (мазут, паливо), могли бути відразу видалені після дощу. Видалення твердих осадів повинно відбуватися регулярно і після ураганів, злив, буревіїв тощо.

Для стоків з автомобільних доріг з високою інтенсивністю руху (більше ніж 15 000 авт/добу) очищення через механічне відділення - необхідний захід, що попереджає попадання в ґрунтові і поверхневі стоки завислих та спливаючих речовин (рис. 7).

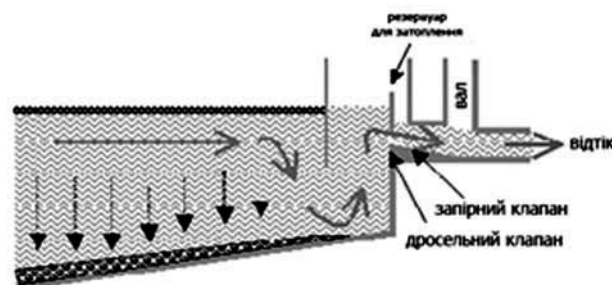


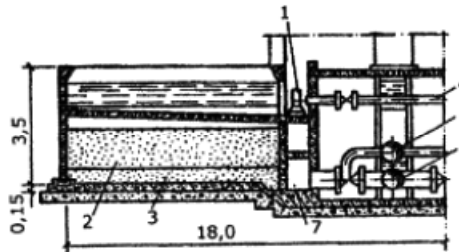
Рисунок 7 - Схема улаштування відстійника для осідання частинок з вертикальним бар'єром для затримання плівки масла і палива

Ступінь очищення поверхневих стоків у таких відстійниках низька, через це їх найчастіше застосовують для скидання непередбачених обсягів води, щоб уникнути надлишкового затоплення території.

Фільтрування рекомендується застосовувати для виділення зі стічних вод тонкодисперсних твердих і рідких часток, які не мають здатності випадати в осад. В якості фільтруючих матеріалів слід



використовувати металеві сітки, тканинні фільтри (бавовняні, зі скловолокна), керамічні, іноді зернисті матеріали - пісок, гравій, торф, вугілля тощо (рис. 8).



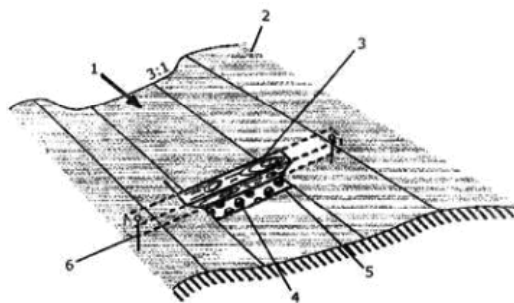
Розміри наведені в міліметрах

1 - донний клапан; 2 - антрацитна крихта; 3 - пісок; 4 - подача води на фільтрування; 5 - відведення профільтрованої води; 6 - подача води на промивання; 7 - переливні жолоби

Рисунок 8 – Схема двошарового фільтру для очищення стоків з автомобільних доріг

Піщаний фільтр для очищення поверхневого стоку з доріг рекомендується робити з трьох окремих шарів: верхній шар - промитий пісок, другий шар - гравій, відокремлений від піску шаром тканини геотекстилю, третій шар - глини (непроникний) для запобігання просочування стоків у ґрунти.

Рослинні смуги (ділянки з густою рослинністю) як альтернативна схема очищення, яка здатна видаляти більше ніж 60 % завислих часток рекомендуються найчастіше влаштовувати на розділювальній смузі (рис. 9) і в бічних резервах.



1 - напрям потоку; 2 - рослинний шар підвищеної щільності; 3 - затримуюча дамба з дерева; 4 - кам'яний накид; 5 - геотекстиль; 6 - арматурний стрижень

Рисунок 9 – Схема очищення поверхневих стоків на розділювальній смузі

Для очищення стоків з автомобільних доріг також рекомендується застосовувати фізико-хімічні методи очищення стоків (флотацію, адсорбцію, іонний обмін, екстракцію тощо) та біохімічні методи [7].

Випаровувальні басейни влаштовуються в дорожньо-кліматичній зоні У-ІІ згідно з ДБН В.2.3-4.

Серед сучасних засобів очищення поверхневих стоків рекомендується використовувати для очищення поверхневих стоків конструкції, які виконані з габйонів [11], дія яких заснована на принципі фільтрації через природні сорбенти - шунгіт і цеоліт.

Альтернативною спорудою очищення стічних вод з автомобільних доріг є біоплато [12], що являє собою штучну водойму, яку засаджено вищою водною рослинністю (макрофітами), в яке стічна вода потрапляє з фільтруючих камер проходячи додаткове очищення від завислих речовин та нафтопродуктів.

Екологічну безпеку природних систем і зниження негативного впливу автомобільних доріг на навколишнє середовище можна забезпечити тільки в результаті взаємодії різних заходів, а саме: своєчасного збору і відведення забрудненого стоку з поверхні автомобільної дороги на очисні споруди; захисту укосів земляного полотна і схилів території, що прилягає, від ерозії; виключення забруднення поверхневими стоками водойм і підземних вод тощо.

1. Проблема очистки ливневого стока с автомагистралей // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов: Научно-информационный бюллетень (по материалам зарубежной печати). - 1987. - №11. - С. 71-83. (Проблеми очищення ливневого стоку з автомагістралей).

2. Букатенко Н. О. Удосконалення процесів миття автомобілів із забезпеченням екологічної безпеки та раціонального використання водних ресурсів. Автореф. дисс. канд. техн. наук: 21.06.01 / НТУ „ХПІ”. – К., 2010.



3. «Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами», затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 25.03.1999 р. № 465.
4. Рекомендації забезпечення ефективного відведення міських зливових стоків та визначення параметрів очисних споруд. Посібник до ДБН. Затверджений: Наказом Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 14.10.08, № 302.
5. Інструкції про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів речовин у водні об'єкти із зворотними водами.
6. Правила приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації населених пунктів України, затверджені наказом Державного комітету будівництва та архітектури України від 19.02.02 №37, зареєстровані в Мін'юсті України 26.04.02 за № 403/6694.
7. Очистные сооружения на автомобильных дорогах. Обзорная информация // Федеральное дорожное агентство министерства транспорта Российской федерации. Информационный центр по автомобильным дорогам. Выпуск 3-2004. (Очисні споруди на автомобільних дорогах. Об зорна інформація)
8. Ильина А.А. Конструкции водоотводных устройств в предбордюрных пространствах, применяемые на автомобильных дорогах зарубежных стран //Автомоб. дороги: Науч.-техн. информ. сб. /Информавтодор. - М., 2001. – Вып 2. - С. 35-43. (Конструкції водовідвідних споруд в предбордюрному просторі, що використовуються на автомобільних дорогах)
9. Ильина А.А. Принципы сбора и отвода воды с разделительных полос на современных автомагистралях // Автомоб. дороги: Информ. сб. /Информавтодор. - 2001. - Вып. 6. - С. 13-23. (Принципи збирання та відведення води з розділювальних смуг на сучасних автомагістралях)
10. СН 496-77 Временная инструкция по проектированию сооружений для очистки поверхностных сточных вод (Тимчасова інструкція по проектуванню споруд для очищення поверхневих стічних вод)
11. Методические рекомендации по применению габионных конструкций в дорожно-мостовом строительстве / ООО «Организатор», Союздорпроект. - М., 2000 (Методичні рекомендації з використання габйонних конструкцій в дорожньо-мостовому будівництві)
12. Стольберг Ф.В., Ладыженский В.Н., Вергелес Ю.И., Ищенко А.В., Худяков А.А. Использование очистных сооружений биоплато для очистки городских сточных вод // Коммунальное хозяйство городов, 2002, вып. 36. – С. 182-185. (Використання очисних споруд біоплато для очищення міських стічних вод)



ЗНЕЗАРАЖЕННЯ СТИЧНИХ ВОД З АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Вступ. Автомобільні дороги та їх обочини засмічуються різними речовинами які змиваються зливовими водами у водоймища є джерелом розповсюдження інфекційних захворювань, що є великим ризиком зараження від мікробів для людей та тварин. Тому проблема знезараження вод є особливо актуальною для всіх регіонів, особливо промислових.

Постановка проблеми. Всім відомо, що в усіх стічних та шахтних водах (у подальшому – водах) міститься велика кількість патогенних бактерій. Навіть в очищених водах виявляються слідуючі патогенні ентеробактерії: збудники черевного тифу, холерні вібріони, патогенні кишечні палички, клебсієлли; кампілобактерії, які визивають кишечні захворювання; легіонелли – збудники легіонелльоза.

В 1 л води вміст патогенних бактерій може досягати десятків тисяч клітин. Все це може призводити до серйозних спалахів захворювань

Крім того в водах можуть зустрічатися більш 110 патогенних, особливо для людини, вірусів. Частіше за все це віруси гепатитів та ентеровіруси.

Особливу небезпеку становить попадання вод в підземні водоносні горизонти.

У зв'язку із зростаючим дефіцитом водних ресурсів і необхідністю використання для технічних потреб очищених вод набула особливого значення необхідність їх знезараження.

Всі ці причини є важливим фактором вирішення проблеми покращення мікробіологічної якості вод перед їх випуском у водойми і використання для різноманітних потреб.

Відносно знезараження стічних вод СанПіН 2.1.5.980-00 «Гігієнічні вимоги до охорони поверхневих вод» вказує: «Стічні води, небезпечні за епідеміологічним критерієм, можуть скидатися у водні об'єкти лише після відповідного очищення і знезараження до числа термотолерантних коліформних бактерій КОЕ/100 мл < 100, числа загальних коліформних бактерій КОЕ/100 мл < 500 і числа коли-фагов БОЕ/100 мл < 100».

Вимоги СанПіН 2.1.4.980-00 «Гігієнічні вимоги до охорони поверхневих вод», що пред'являються мікробіологічній якості знезаражених очищених стічних вод перевищують аналогічні вимоги, які діють за кордоном. Так, найпоширенішим нормативом, прийнятим, наприклад, в США (ця країна надає найбільшу увагу з усіх західних держав проблемі знезараження стоків), є вміст фекальних (термотолерантних) коліформ 2 000 КОЕ/л у водоймищах, де можливий прямий контакт людини із стічною водою.

Найбільш близькі до російських нормативів рекомендації ЄЕС за якістю води водоймищ для купання, які фактично співпадають з вимогами, що пред'являються до водоймищ комунально-побутового водокористування (колі-індекс 5 000 КОЕ/л). Проте, дані нормативи носять рекомендаційний характер. Нормативи, які повинні суворо виконуватися для водоймищ цієї категорії за нормами ЄЕС вдвічі вище і відповідають нормам водоймищ господарсько-питного призначення (колі-індекс 10 000 КОЕ/л).

Аналіз досліджень. В даний час знезараження вод здійснюється в основному хлором, що є високотоксичним фактором по відношенню до рибного господарства і всього біоценозу водоймищ. Це пов'язано з наявністю у знезараженій хлором воді як остатнього хлору (тільки нормативна залишкова величина його складає 1,5 мг/л), так і великої кількості хлорамінів та хлорорганічних речовин. Крім того хлорні господарства є небезпечними в експлуатації та вимагають великих витрат при транспортуванні хлора.

Всі ці недоліки, притаманні хлоруванню, стали причиною для масового впровадження за кордоном станцій дехлорування та методу знезараження ультрафіолетовим випромінюванням. Були розроблені програми захисту навколишнього середовища.

За результатами роботи за цими програмами на основі серйозних досягнень в області світло- і електротехніки було створено устаткування по знезараженню природних і стічних вод ультрафіолетовим випромінюванням, за своїми техніко-експлуатаційними показниками прийнятне для станцій великої продуктивності.

В останні 15 років відбувається масове зростання впровадженнь методу УФ знезараження на очисних спорудах каналізації різної продуктивності.

В даний час в країнах Європи і Північної Америки експлуатується більше 2000 станцій.

Інформаційний пошук по застосуванню різних методів знезараження, проведений «МосводоканалНІІпроект» на 162 зарубіжних станціях, виявив наступні результати:

- хлорування застосовується на 103-х станціях (64% від загальної кількості);



- у тому числі, хлорування з дехлоруванням на 27-ми станціях (17%);
- УФ знезараження на 53-х станціях (33%);
- озонування на 6-ти станціях (4%);

А якщо виділити тільки крупні станції (продуктивністю більше 100 тис. м³/сут), то виходить наступне:

- хлорування - 40%;
- хлорування з дехлоруванням - 23%;
- УФ знезараження - 50%;
- озонування - 10%.

Тобто, в країнах Європи і Північної Америки метод знезараження УФ випромінюванням для крупних станцій стає найпереважнішим.

Відомі і дуже крупні станції УФ знезараження, такі як в містах Міннеаполіс - 850 тис. м /добу, Калгарі - 1 млн. м /добу.

Широкомасштабні роботи по застосуванню УФ випромінювання для знезараження стічних вод в країнах СНД були розпочаті в кінці 80-х років. В роботах брали участь ведучі науково-дослідні, проектні і виробничі організації: НВО «ЛІТ», НДІ Гігієни ім.Ф.Ф.Ерісмана, НДІ ЕЧІГОС ім. А.Н. Сисіна, ГЦ РФ НДІ ВОДГЕО, АТ Ростовводоканалпроект, АТ «АвтоВаз» і ін.

Протягом тільки останніх 3 років більше ніж на 50 діючих очисних спорудах проведені дослідження по можливості застосування методу УФ знезараження і визначенню його технічних і експлуатаційних показників. На ряді об'єктів комунального господарства були створені і пройшли довготривалі випробування крупні досвідчено-промислові комплекси.

Результати наукових досліджень і досвідчено-промислових випробувань підтвердили технічну можливість і високу ефективність УФ знезараження в промислових умовах великих об'ємів виробничо-побутових стічних вод з показниками якості, які характерні для традиційних в країнах СНД комунальних очисних споруд каналізації, які експлуатуються за схемою повного біологічного очищення. УФ установки також можуть успішно застосовуватись для знезараження виробничих стічних вод, що підтверджено відповідними дослідженнями на підприємствах нафтової, хімічної, енергетичної, харчової і інших галузей промисловості.

В даний час в країнах СНД УФ знезараження стічних вод набуває все більше поширення (рис. 1).

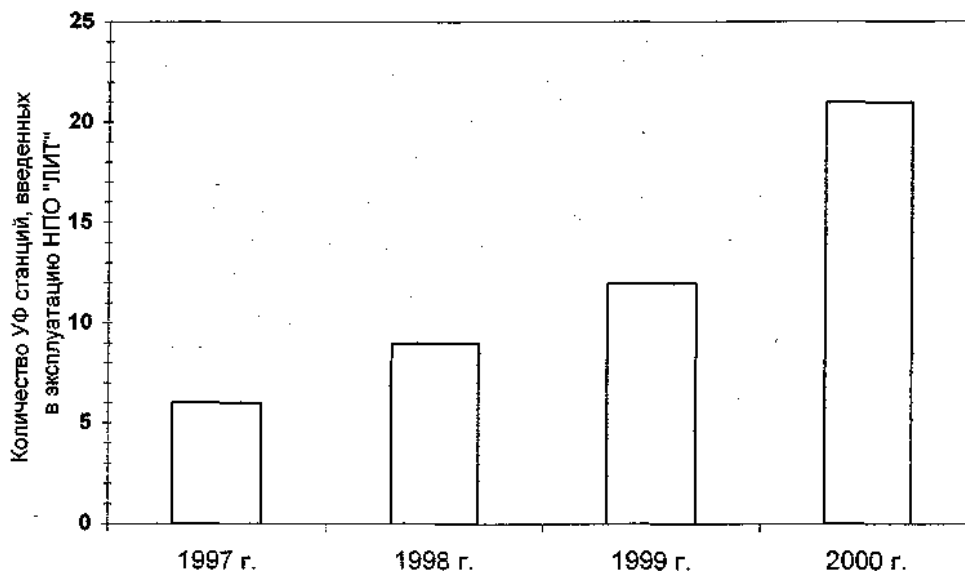


Рисунок 1 – Кількість станцій УФ знезараження стічної води, введених в експлуатацію НВО «ЛІТ»

В СНД експлуатується найбільша в Європі станція УФ знезараження на очисних спорудах каналізації в Автозаводському районі м. Тольятті Самарської обл. продуктивністю 290 тис. м /добу.

Виконана проектно-будівельна документація станції УФ знезараження на міських очисних спорудах каналізації р. Самара продуктивністю 1 млн. м³/добу. В МП «Мосводоканал» розроблений проект концепції знезараження очищених виробничо-побутових стічних вод на найбільших Московських станціях аерації (Люберецькій станції аерації продуктивністю 2,5 млн. м/добу і Кур'янівській станції аерації продуктивністю



3,125 млн. м/добу), в якому, на підставі рангової оцінки, як метод знезараження рекомендовано застосування УФ випромінювання.

Мета статті. На підставі виконаного нами аналізу, досліджень та розрахунків запропонована нова технологія знезараження від бактерій та вірусів шахтних та стічних вод.

Аналіз основного матеріалу досліджень. Вже на початку XX-го століття в перших роботах по дослідженню дії УФ на живі організми був знайдений оптимум довжин хвиль для інактивації мікроорганізмів, який знаходиться в області 250-266 нм, і була побудована крива бактерицидної дії.

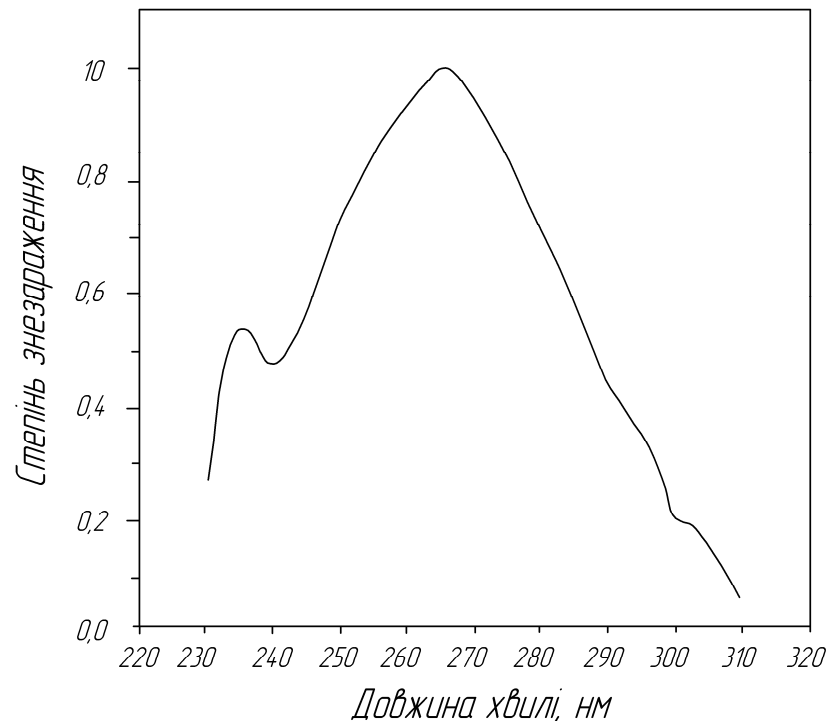


Рисунок 2 – Крива бактерицидної дії ультрафіолету

Розуміння механізму УФ знезараження було досягнуте в 60-х роках при зіставленні дії УФ з реакціями, що відбуваються в молекулах ДНК. Із співвідношення між кривою бактерицидної дії УФ і спектром поглинання ДНК і протеїну (рис. 3) видно, що інактивація бактерій відбувається в основному за рахунок необоротних пошкоджень ДНК.

Головну роль при цьому грає утворення тімінових і пиримідинових димерів, відповідальних за летальне пошкодження ДНК, а також пиримидін-пиримідинові і пурин-пиримідинові оддукти, зухвалі мутації. Крім того, при УФ опромінюванні утворюються міжниткові зшивання і одониткові розриви молекул ДНК. Енергії одного кванта короткохвильового УФ недостатньо для розриву ланцюга або зшивання, тому ці процеси є східчастими. Наголошується пошкодження РНК в бактеріях, внаслідок чого відбувається уповільнення синтезу. При дії УФ на білки найвірогіднішим є пошкодження клітинних мембран.

Формула для ступеня знезараження виглядає таким чином:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k \cdot I \cdot t}, \quad (1)$$

де N_0 – кількість клітин до опромінювання;

N – кількість клітин після опромінювання;

I – інтенсивність УФ випромінювання;

t – час опромінювання;

k – коефіцієнт, який залежить від виду мікроорганізмів.

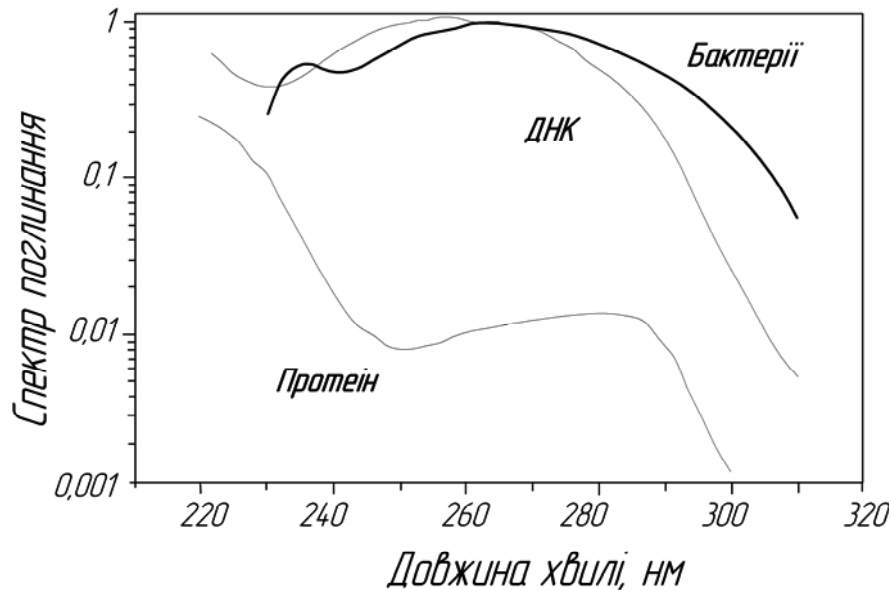


Рисунок 3 – Крива бактерицидної дії УФ і спектри поглинання ДНК і протеїну

Опірність багатьох типів мікроорганізмів до УФ випромінювання міняється значно від малих доз для бактерій до дуже великих доз для спор. Більш того, оточуюче мікроорганізми середовище дуже впливає на необхідну дозу. Наприклад, для інактивації *Escherichia coli* у воді потрібна доза в 5-10 разів більше, ніж в повітрі. Для того, щоб поруйнувати мікроорганізм, УФ квант повинен поглинутися ДНК, РНК або білком, що знаходиться усередині мікроорганізму. Звичайно грам-позитивну бактерію з товстою капсулою протоплазми набагато складніше знищити, ніж грам-негативну бактерію з тонкою капсулою. В більшості випадків мікроорганізми по ступеню опірності до УФ розташовуються таким чином: вегетативні бактерії < віруси < бактерійні спори < цисти < найпростіші.

Доза опромінювання (або кількість енергії, яка передається мікроорганізмам) є головною характеристикою установки УФ знезараження.

$$D = I \cdot t \quad (2)$$

Вона залежить від середньої інтенсивності (I) опромінювання і часу знаходження під опромінюванням (t).

Наступне рівняння є добрим першим наближенням, що описує інактивацію мікроорганізмів залежно від прикладеної дози опромінювання.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k \cdot D}. \quad (3)$$

Проте, безпосередні вимірювання, проведені на реальних стічних водах, показують залежність, сильно відмінну від теорії (рис. 4). Пряма 1 є теоретичною, згідно приведеному вище рівнянню, а криві 2 і 3 — експериментальна залежність для стічної води, що пройшла відповідно очищення (2) і доочистку (3).

Основними джерелами УФ випромінювання, вживаними в технології УФ дезинфекції, є газорозрядні лампи, заповнені сумішшю парів ртуті та інертних газів.

Відомо, що УФ випромінювання поглинається водою і розчиненими в ній речовинами. При цьому інтенсивність падає у міру проникнення променя вглиб рідини. Послаблення пучка описується законом Бугера-Ламберта-Бера.

Ефективність знезараження залежить від коефіцієнта пропускання УФ випромінювання водою на довжині хвилі 254 нм, а також від концентрації забруднюючих речовин. Коефіцієнт пропускання визначає середню інтенсивність УФ випромінювання в камері знезараження УФ установок. Коефіцієнт пропускання визначає частку УФ випромінювання довжиною хвилі 254 нм, що пропускається шаром води товщиною в 1 см, і складає 40-70 % для очищених стічних вод і 50-80 % для доочищених стічних вод. Чим більше коефіцієнт пропускання, тим більше середня інтенсивність УФ випромінювання і, отже, більше доза УФ опромінювання, вище ефект знезараження.



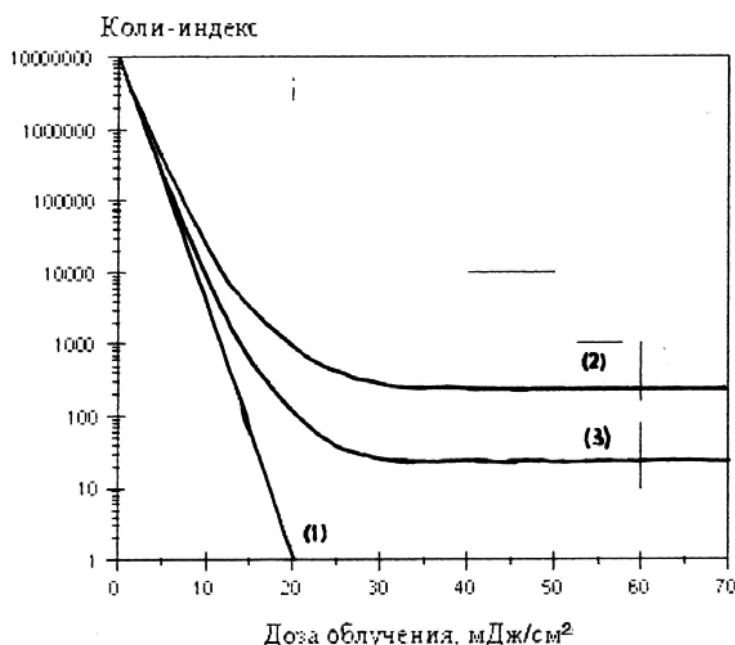


Рисунок 4 – Залежність коли-індекса стічної води від дози УФ випромінювання

При підвищеній концентрації зважених речовин можливо зниження ефекту знезараження, що вимагає збільшення дози УФ опромінювання для забезпечення необхідних показників.

Наявність в оброблюваній воді великої кількості органічних речовин, наприклад, нафтопродуктів робить вплив на тривалість міжпромивального періоду кварцових чохлів, який може мінятися від одного до чотирьох місяців.

Основною задачею при виборі УФ устаткування є визначення ефективної дози УФ випромінювання, достатньої для знезараження конкретних стічних вод до мікробіологічних показників якості, які вимагаються нормативами.

Розробка УФ систем великої продуктивності вимагає комплексного наукового і технологічного підходу до розробки і впровадження методу УФ знезараження стічних вод.

Для забезпечення найбільшої ефективності при впровадженні технології УФ знезараження процес розробки і впровадження повинен включати наступні етапи:

1. Оцінка особливостей експлуатації і показників якості води.
2. Вимірювання основних характеристик, що визначають ефективність УФ знезараження.
3. Розрахунки і вибір типу УФ устаткування.

Висновки:

1. На відміну від хлорування і озонування, після дії УФ у воді не утворюється шкідливих органічних сполук навіть у разі багатократного перевищення необхідної дози. Це, зокрема, дозволяє значно спростити контроль за процесом знезараження і не проводити аналізи на визначення вмісту у воді остаточної концентрації дезінфектанта.

2. УФ опромінювання летально для більшості водних бактерій, вірусів, спор і простіших. Воно знищує збудників таких інфекційних хвороб, як тиф, холера, дизентерія, вірусний гепатит, поліомієліт і ін. УФ випромінювання інактивує навіть ті віруси, які не піддаються дії хлора.

3. Метод УФ випромінювання безпечний для людей, відсутня необхідність створення складів токсичних хлорвміщуючих реагентів, що вимагають дотримання спеціальних заходів технічної і екологічної безпеки, що підвищує надійність систем водопостачання і каналізації в цілому.

4. Процес знезараження може бути легко автоматизований.

5. При УФ випромінюванні нема проблем корозії технологічного обладнання.

6. Для знезараження УФ випромінюванням характерні більш низькі, ніж при хлоруванні і тим більше, озонуванні експлуатаційні витрати. Це пов'язано з порівняно невеликими витратами електроенергії (в 3-5 разів меншими, ніж при озонуванні); відсутністю потреби в дорогих реагентах; рідкому хлорі, гіпохлориті натрію або кальцію, а також у відсутності необхідності в реагентах для дехлорування.



УДК 624.042

Зинченко Е.В. инженер

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор, академик РАТ,

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ И ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ НА ИХ СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СДВИГОВЫМ ДЕФОРМАЦИЯМ

В последнее время задача обеспечения долговечности современных типов гидроизоляции и дорожной одежды на мостовых сооружениях приобрела особую актуальность, как в теоретическом, так и в практическом отношении. А так как теоретические исследования должны опираться на надежный экспериментальный фундамент, то весьма важными являются экспериментальные исследования влияния гидроизоляции и дорожной одежды различных типов на сопротивляемость дорожной одежды мостовых сооружений сдвиговым деформациям. В связи с этим с помощью начальника испытательной лаборатории ОАО «Тоннельный отряд №44», к.т.н. Дьякова К.А. И заместителя начальника испытательной лаборатории к.т.н. Черского Р.М. была реализована соответствующая программа исследований.

1) Оценка сдвигающих напряжений, возникающих на подошве границе дорожной одежды.

Оценка сдвигающих напряжений производилась из того расчета, что коэффициент сцепления шины (равный отношению величины максимального тягового усилия T к вертикальной нагрузке на колесо P , при превышении которого начинается пробуксовывание ведущего колеса или проскальзывание заторможенного) с сухим асфальтобетонным покрытием составляет $\phi=0,55...0,60$. Следовательно, при действии современных грузовых автомобилей с шинами 425/65 R 22.5, имеющими площадь отпечатка $S=67850$ мм² (диаметр отпечатка $D = 29,4$ см) и вызывающими максимальное вертикальное напряжение $\sigma=0,98$ Н/мм² (МПа), максимальное сдвигающее напряжение на поверхности покрытия составит в среднем $\tau=\sigma \cdot \phi=0,98 \cdot 0,58=0,57$ МПа. При толщине дорожной одежды в 10 см отношение глубины Z залегания низа дорожной одежды к диаметру D отпечатка колеса автомобиля равняется $Z/D = 10/29,4=0,34$. При таком соотношении вертикальные напряжения составляют величину порядка 50 % от нагрузки на поверхности дорожной одежды. Отсюда, если учесть распределяющую способность дорожной одежды, при её толщине 10 см на её нижней границе величина сдвигающего напряжения уменьшится до величины $\phi=0,57 \cdot 0,5 = 0,29$ МПа.

В результате экспериментального исследования зависимости количества циклов приложения нагрузки до разрушения от ее величины и построения соответствующей кривой Велера (Рис. 1) было установлено, что безопасный уровень сдвигающих напряжений составляет половину разрушающей нагрузки.

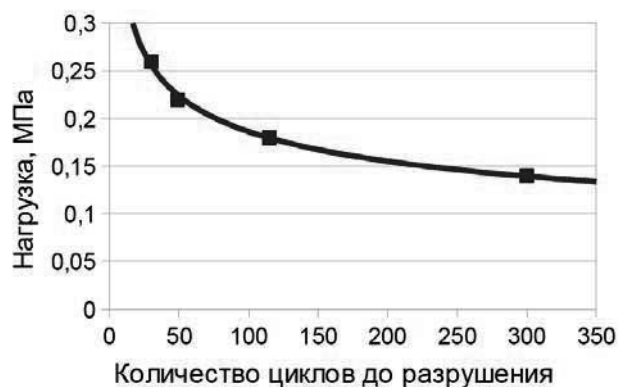


Рис. 1. Характерная кривая Велера при испытании на разрушение при сдвиге

При разрушающей одноцикловой нагрузке 0,60 МПа остальные образцы испытывались циклическим нагружением при величинах нагрузки 0,50 МПа; 0,40 МПа и 0,30 МПа с регистрацией количества циклов нагружения до достижения деформации сдвига равной разрушающей за 1 цикл.

При уровне нагружения 0,30 МПа количество циклов до достижения максимальной деформации стремится к бесконечности и эта величина может быть принята за безопасный уровень нагрузки, который превышает возникающие в конструкции и рассчитанные выше сдвигающие напряжения.



Следовательно, предельное напряжение сдвига при одноцикловом нагружении, которое реализуется в эксперименте, должно быть не ниже 0,58 МПа.

2. Методика определения предельных сдвигающих напряжений между слоем гидроизоляции и асфальтобетоном

Для определения сопротивляемости системы бетон-гидроизоляция - асфальтобетон к сдвиговым деформациям была разработана специальная методика. На плиты, изготовленные из бетона класса В30, наносились различные варианты гидроизоляции, на которую укладывалась асфальтобетонная смесь литого типа, которая, как установлено мировой практикой, является наиболее эффективной для устройства дорожных одежд на мостовых сооружениях. Далее, по истечении не менее 24 часов полученные многослойные конструкции распиливались таким образом, чтобы получить образцы-призмы с заданным уклоном плоскости гидроизоляции к направлению действия нагрузки. Этим регулировалось отношение вертикальных нагрузок к горизонтальным для максимального приближения к реальным условиям эксплуатации (Рис.2).



Рис. 2. Образец-призма для испытания на сдвигоустойчивость системы:
бетон – гидроизоляция - литой асфальтобетон

Для коэффициента сцепления $\varphi=0,58$ наклон плоскости сдвига, т.е. отношение горизонтальной силы к вертикальной также составляет 0,58. Перед испытанием образцы выдерживались в воде при заданной температуре 40 °С в течении 1,5 часов. Скорость нагружения составляла 3 мм/мин. Критерием отказа считалась максимальная нагрузка перед ее снижением на 5% за 2 секунды.

3. Анализ ряда систем гидроизоляции и дорожной одежды

Исследовались систем дорожной одежды мостового полотна:

Система №1:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Праймер битумно-полимерный ТЕХНОНИКОЛЬ № 03
3. Слой оклеечной гидроизоляции Техноэластмост С
4. Литой/вибролитой асфальтобетон

Система №2:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Грунтовка на основе эпоксидной смолы — Sikafloor-161VP
3. Мембрана на основе полимочевины — Sikalastic-842 BG
4. Слой сцепления из битумо-латексной эмульсии — Sikalastic-825
5. Литой/вибролитой асфальтобетон

Система №3:

1. Бетон плиты мостового полотна
2. Грунтовка на основе эпоксидной смолы — Sikafloor-161VP
3. Мембрана на основе полимочевины — Sikalastic-842 BG с втопленным щебнем (фракции 3-7 мм)



4. Слой сцепления из битумо-латексной эмульсии — Sikalastic-825
5. Литой/вибролитой асфальтобетон

Система №4:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Грунтовочный слой - Kolcoat PUR Ferro
3. Гидроизоляционный слой из полимочевины — Kolflex 301 LC
4. Адгезионный слой — Kolcoat TL
5. Литой/вибролитой асфальтобетон

Система №5:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Грунтовочный слой - Kolcoat PUR Ferro
3. Гидроизоляционный слой из полимочевины — Kolflex 301 LC
4. Адгезионный слой — Kolcoat TL с втопленным щебнем (фракции 3-7 мм)
5. Литой/вибролитой асфальтобетон

Система №6:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Грунтовочный слой - Kolcoat PUR Ferro
3. Гидроизоляционный слой из полимочевины — Kolflex 301 LC
4. Слой из полимочевины Колфлекс 301ЕС с втопленным щебнем (фракции 3-7 мм) с расходом 600 г/м²
5. Адгезионный слой — Kolcoat TL
6. Вибролитой асфальтобетон

Система №7:

1. Бетон плиты проезжей части
2. Грунтовочный слой - Kolcoat PUR Ferro
3. Гидроизоляционный слой из полимочевины — Kolflex 301 LC
4. Слой из полимочевины Колфлекс 301ЕС с втопленным щебнем (фракции 3-7 мм) с расходом 1000 г/м²
5. Адгезионный слой — Kolcoat TL
6. Вибролитой асфальтобетон

Значения предельных сдвигающих напряжений, полученных как средние из результатов испытаний трех образцов для каждой системы, представлены ниже в таблице 1.

Таблица 1.

Предельные сдвигающие напряжения для различных систем дорожной одежды мостового полотна.

Исследуемые системы	Предельное сдвигающее напряжение, МПа	Требуемое сдвигающее напряжение, МПа	Характер разрушения
Система №1 с литым а/б	0,090	0,580	По границе гидроизоляции с бетоном
Система №1 с вибро-литым а/б	0,096		По гидроизоляции
Система №2 с литым а/б	0,238		По границе гидроизоляции с асфальтобетоном
Система №2 с вибро-литым а/б	0,257		По границе гидроизоляции с асфальтобетоном
Система №3 с литым а/б	0,587		По асфальтобетону
Система №3 с вибро-литым а/б	0,632		По асфальтобетону
Система №4 с литым а/б	0,311		По границе гидроизоляции с асфальтобетоном
Система №4 с вибролитым а/б	0,341		По границе гидроизоляции с



		асфальтобетоном
Система №5 с литым а/б	0,368	По границе гидроизоляции с асфальтобетоном
Система №5 с вибролитым а/б	0,421	По границе гидроизоляции с асфальтобетоном
Система №6	0,598	По асфальтобетону
Система №7	0,659	По асфальтобетону

Характер разрушения некоторых систем представлен на рисунках 3 и 4.

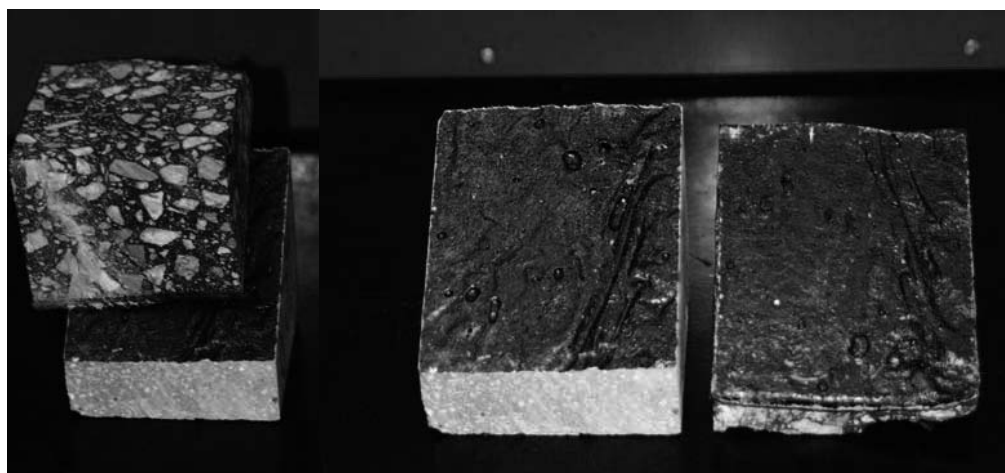


Рис. 3. Характер разрушения системы дорожной одежды №1

Анализ полученных данных показывает, что для обеспечения долговечной работы дорожной одежды мостового полотна в сложных условиях эксплуатации, необходимо не только прочное склеивание всех слоев дорожной одежды (межслойное сцепление), но и наличие специального фрикционного слоя между гидроизоляцией и нижним слоем дорожной одежды. Фрикционный слой, устраиваемый путем втапливания мелкого щебня фракции 3 - 7 мм в дополнительный слой гидроизоляционного материала высокой прочности (например, полимочевины), позволяет эффективно противостоять сдвигающим напряжениям. В то же время втапливание щебня в относительно деформативный материал (адгезионный слой из полимерно-битумного вяжущего - система №5) не дает такого же эффекта. Использование вышеуказанной фракции мелкого щебня 3 - 7 мм обусловлено тем, что в этом случае обеспечивается оптимальное соотношение между глубиной втапливания зерен щебня в дополнительный слой гидроизоляционного материала, толщина которого по экономическим соображениям составляет, как правило, 1,5 - 2 мм, и в нижний слой дорожной одежды.



Рис. 4. Характер разрушения системы дорожной одежды № 3



Применение более мелких фракций не позволяет создать прочного зацепления нижнего (асфальтобетонного) слоя дорожной одежды, а более крупных - приводит к вырыванию втопленных щебенки колесами построечного автотранспорта до укладки нижнего слоя дорожной одежды. Проведенные исследования также показали, что оптимальный расход мелкого щебня при устройстве фрикционного слоя составил 800 - 1000 г/м².

Проведенные исследования позволили установить, что требуемое условиями эксплуатации сдвигающее напряжение может быть обеспечено применением следующих систем дорожной одежды: **№3, №4, №6, №7.**

Кроме того, для обеспечения долговечной работы дорожной одежды мостового полотна в сложных условиях эксплуатации, необходимо не только прочное склеивание всех слоев дорожной одежды (межслойное сцепление), но и наличие специального фрикционного слоя между гидроизоляцией и асфальтобетонным покрытием. Фрикционный слой, устраиваемый путем втапливания мелкого щебня фракции 3 - 7 мм в дополнительный слой гидроизоляционного материала высокой прочности (например, полимочевины), позволяет эффективно противостоять сдвигающим напряжениям.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВОДОНАСИЧЕНОГО ҐРУНТОВОГО МАСИВУ У ПРОЦЕСІ ЙОГО ОСУШЕННЯ

При проектуванні об'єктів будівництва на водонасичених ґрунтових основах виникає необхідність у визначенні їх напружено-деформованого стану (НДС). Основними кількісними характеристиками НДС ґрунту основ є напруження, деформації та зміщення. Знаючи НДС ґрунту основи споруди, можна прогнозувати стійкість, надійність та безпеку експлуатації даного об'єкта.

Суттєві зміни НДС викликають: наповнення або спорожнення водоймищ; фільтрація рідини; пониження рівня ґрунтових вод тощо. Пониження рівня підземних вод викликає значне осідання поверхні землі на великих площах, які іноді займають сотні квадратних кілометрів.

Фізико-хімічні процеси також здійснюють значний вплив на ґрунтові масиви та розміщені на них споруди. Особливо у зв'язку з використанням все більш глибоких горизонтів земної кори як основи масивних споруд і середовища для влаштування підземних споруд.

Аналіз останніх досліджень показав, що існує ряд теоретичних рішень визначення НДС ґрунтових масивів [1,2]. Однак питання оцінки НДС водонасичених ґрунтових масивів у процесі їх осушення на будь-який момент часу недостатньо вивчено.

Метою роботи є отримання теоретичних залежностей, що описують положення депресійної поверхні в ґрунтовому масиві та вертикальні зміщення його поверхні при пониженні рівня води в горизонтальних відкритих дренах. При цьому в одній горизонтальній дрени пониження рівня води буде відбуватися з однією швидкістю, а в другій – з іншою.

Постановка задачі. Розглянемо задачу пониження рівня ґрунтових вод у ґрунтовому масиві шляхом відкачування води з відкритих горизонтальних дрена (рис.1).

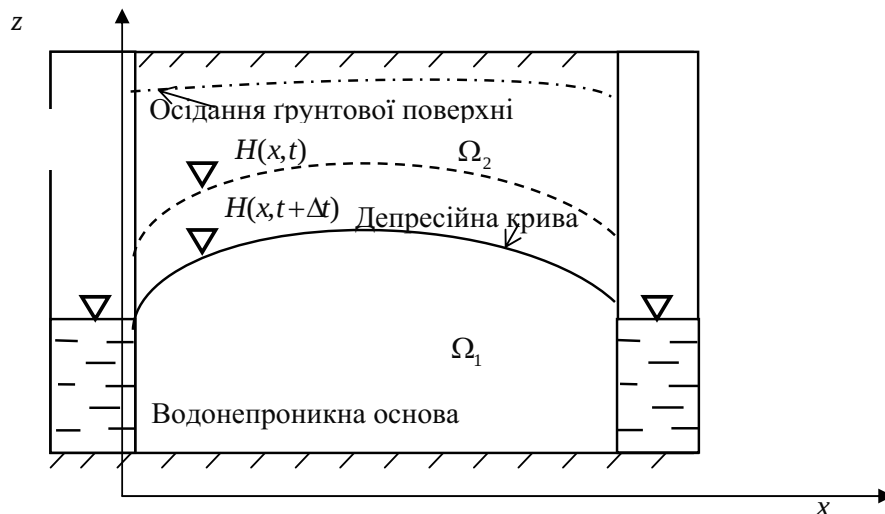


Рис. 1. Схема ґрунтового масиву при його осушенні

У зв'язку з осушенням верхньої частини ґрунту та інтенсивними фільтраційними потоками води змінюється НДС ґрунтового масиву, в результаті чого поверхня ґрунту починає просідати.

У результаті розв'язку задачі необхідно: розрахувати поле напорів води у ґрунтовому масиві; визначити НДС ґрунтового масиву; отримати зміщення верхньої межі ґрунтового масиву.

Математична модель та розв'язання задачі. Для проведення математичного моделювання даних процесів зроблено наступні припущення:

- 1) розглядається двовимірна задача;
- 2) ґрунтовий масив має форму прямокутника, обмеженого з обох боків горизонтальними дренами, а знизу водонепроникною нерухомою основою;
- 3) пониження рівня води в горизонтальних дренах відбувається за лінійним законом зі швидкостями V_0 та V_1 ;
- 4) навантаження на поверхні ґрунту відсутні;
- 5) ґрунт розглядається як двофазне середовище;



6) за рахунок невисокої швидкості пониження рівня ґрунтових вод у дренажних системах розглядаються напори й зміщення у фіксовані моменти часу;

7) ґрунт вважається пружним середовищем, тому його можна розглядати в межах лінійної теорії пружності.

Для того, щоб знайти вертикальні зміщення ґрунтової поверхні, необхідно знати напори в усіх точках ґрунтового масиву на певний момент часу.

Для визначення напорів у змінній області $\Omega_1 = \{(x, z, t) \mid x \in (0, l), z \in (0, h(x, t)), t > 0\}$ знайдемо розв'язок диференціального рівняння нестационарної фільтрації, що має вигляд

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{kh_{col}}{\mu} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

при таких крайових умовах:

$$H(x, z, 0) = H_1(x, z), \quad (2)$$

$$H(0, z, t) = H_0(0) - V_0 t, \quad (3)$$

$$H(l, z, t) = H_0(l) - V_l t, \quad (4)$$

$$\frac{\partial H(x, 0, t)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$H(x, h(x, t), t) = h(x, t), \quad (6)$$

де $H(x, z, t)$ – напір води в момент часу t у точці (x, z) ґрунтового масиву; k – коефіцієнт фільтрації; h_{col} – потужність фільтраційного потоку; μ – коефіцієнт водовіддачі; $H_1(x, z)$ – розподіл напорів у початковий момент часу; $H_0(x)$ – висота розміщення ґрунтових вод у початковий момент часу (відома функція); $h(x, t)$ – висота розміщення ґрунтових вод у момент часу t .

Введемо позначення

$$a^2 = \frac{kh_{col}}{\mu}. \quad (7)$$

Тоді рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right). \quad (8)$$

Для розв'язання цієї задачі потрібно знайти $h(x, t)$ та $H_1(x, z)$. У зв'язку з цим розглянемо дві допоміжні задачі.

Задача 1. В області $\Omega = \{(x, t) \mid x \in (0, l), t > 0\}$ знайти розв'язок диференціального рівняння

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (9)$$

при таких крайових умовах:

$$h(x, 0) = H_0(x), \quad (10)$$

$$h(0, t) = H_0(0) - V_0 t, \quad (11)$$

$$h(l, t) = H_0(l) - V_l t. \quad (12)$$

Задача 2. В області $\Omega = \{(x, z) \mid x \in (0, l), z \in (0, H_0(x))\}$ знайти розв'язок диференціального рівняння

$$\frac{\partial^2 H_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_1}{\partial z^2} = 0 \quad (13)$$

при таких крайових умовах:

$$\frac{\partial H_1(x, 0)}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$H_1(0, z) = H_0(0), \quad (15)$$

$$H_1(l, z) = H_0(l), \quad (16)$$

$$H_1(x, H_0(x)) = H_0(x). \quad (17)$$

Розв'яжемо задачу (9)-(12). Вимагаємо, щоб $H_0(x) \in C^{(1)}(0, l)$.



Зведемо однорідне рівняння до неоднорідного, але з однорідними граничними умовами. Для цього проведемо заміну

$$h(x, t) = v(x, t) + H_0(0) - V_0 t + \frac{H_0(l) - V_l t - (H_0(0) - V_0 t)}{l} x. \quad (18)$$

Отримаємо наступну крайову задачу:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + f(x), \quad (19)$$

$$v(x, 0) = H_0(x) - H_0(0) - \frac{H_0(l) - H_0(0)}{l} x, \quad (20)$$

$$v(0, t) = v(l, t) = 0, \quad (21)$$

$$\text{де} \quad f(x) = V_0 + \frac{V_l - V_0}{l} x. \quad (22)$$

Позначимо $v(x, 0) = \varphi(x)$.

Розв'язок даної задачі на основі [3] має вигляд:

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t} \sin \frac{\pi n}{l} x + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\int_0^t e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 (t-\tau)} f_n(\tau) d\tau \right) \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad (23)$$

$$\text{де} \quad A_n = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(\xi) \sin \frac{\pi n}{l} \xi d\xi, \quad f_n(t) = \frac{2}{l} \int_0^l f(\xi, t) \sin \frac{\pi n}{l} \xi d\xi. \quad (24)$$

Функції f_n у даному випадку обчислюються наступним чином:

$$f_n = \frac{2}{\pi n} (V_0 - V_l (-1)^n). \quad (25)$$

Підставивши f_n в отриманий розв'язок та звівши доданки біля однакових $\sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right)$, отримаємо

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(A_n e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t} + \frac{2}{\pi n} (V_0 - V_l (-1)^n) \int_0^t e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 (t-\tau)} d\tau \right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) \right). \quad (26)$$

Повернувшись до заміни, отримаємо

$$h(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(A_n e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t} + \frac{2}{\pi n} (V_0 - V_l (-1)^n) \int_0^t e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 (t-\tau)} d\tau \right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) \right) + H_0(0) - V_0 t + \frac{H_0(l) - V_l t - (H_0(0) - V_0 t)}{l} x. \quad (27)$$

Після спрощення, рівняння (27) можна записати у вигляді

$$h(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(A_n e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t} + \frac{2}{\pi n} (V_0 - V_l (-1)^n) \left(\frac{l}{\pi n a} \right) \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 t} \right) \right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) \right) + H_0(0) - V_0 t + \frac{H_0(l) - V_l t - (H_0(0) - V_0 t)}{l} x, \quad (28)$$

$$\text{де} \quad A_n = \frac{2}{l} \int_0^l H_0(x) \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) dx + \frac{2}{\pi n} (-H_0(0) + H_0(l) (-1)^n). \quad (29)$$

Цю ж задачу ми розв'язали числовими методами за допомогою явної та неявної різницьових схем. Усі три результати співпали в межах заданої точності.

Тепер, коли ми впевнились у правильності розв'язку задачі (9)-(12), приступимо до розв'язання задачі (13)-(17).

Для цього здійснимо чисельне конформне відображення області

$\Omega = \{(x, z) \mid x \in (0, l), z \in (0, H_0(x))\}$ на параметричний прямокутник. Побудована сітка конформного відображення є гідродинамічною сіткою, тобто розв'язком задачі. Значення напорів на лініях рівних напорів рівні значенням у верхніх точках цих ліній, які, в свою чергу, рівні вертикальній координаті поверхні ґрунтових вод.



Для розв'язання задачі (8),(2)-(6) перейдемо до змінних ξ, η :

$$\xi = \xi(x, z), \eta = \eta(x, z). \quad (30)$$

З умов Коші-Рімана маємо:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial z}, \frac{\partial \xi}{\partial z} = -\frac{\partial \eta}{\partial x}. \quad (31)$$

Підставивши (30) у (8), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} = a^2 & \left(\frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial H}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial H}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} \left(\frac{\partial \xi}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{\partial H}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial z} \right)^2 + \frac{\partial H}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial \xi}{\partial z} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (32)$$

Врахувавши те, що $\xi(x, z)$ та $\eta(x, z)$ – спряжені гармонічні функції, матимемо

$$\frac{\partial H}{\partial t} = a^2 \left(\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right) \left(\frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} \right). \quad (33)$$

Оскільки отримане рівняння досить складне, ускладнюються також крайові умови, проведемо спрощення згідно вище зробленого припущення про повільне відкачування води із дрен. Приймемо

$$\frac{\partial H}{\partial t} = 0. \text{ Тоді рівняння (33) набуде вигляду}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} = 0. \quad (34)$$

У цьому випадку побудована при чисельному конформному відображенні сітка буде гідродинамічною сіткою, тобто розв'язком задачі (8),(2)-(6). Розв'язання буде аналогічним, як розв'язання задачі (14)-(18). При цьому використовуємо отримані точні формули для $h(x, t)$ (для обчислення застосовуються заміна суми ряду скінченною сумою, інтегрування методом парабол). Перевагою даного підходу є те, що ми можемо знаходити напори й зміщення в будь-який момент часу, не знаходячи їх у попередні моменти часу (лише у початковий момент часу).

Розв'яжемо задачу (8), (2)-(6) без спрощення рівняння (33). Для розв'язання параболічного рівняння (33) застосуємо два методи: ітераційний та локально-одновимірну схему Самарського.

Між модулями похідних справедливе співвідношення

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} \right)^2}. \quad (35)$$

З урахуванням (35) (33) набуде вигляду

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{a^2}{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi} \right)^2} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial \eta^2} \right). \quad (36)$$

Як початкову умову для обох методів використаємо гідродинамічну сітку, побудовану для задачі (13)-(17).

Розглянемо ітераційний метод. Нехай знайдено значення функції H у вузлах сітки області у площині xOz на перших k кроках по часу, $k \geq 0$. На $k+1$ кроці задаємо початкові значення функції H на кожній вертикалі рівні значенню напору у верхній точці, тобто координаті РГВ.

Провівши різницеву апроксимацію рівняння (36), отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{H_{ij}^{k+1} - H_{ij}^k}{\tau} = & \frac{a^2}{\left(\frac{x_{i+1,j}^{k+1} - x_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2 + \left(\frac{z_{i+1,j}^{k+1} - z_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2} \times \\ & \times \left(\frac{H_{i+1,j}^{k+1} - 2H_{ij}^{k+1} + H_{i-1,j}^{k+1}}{h_i^2} + \frac{H_{i,j+1}^{k+1} - 2H_{ij}^{k+1} + H_{i,j-1}^{k+1}}{h_j^2} \right), \end{aligned} \quad (37)$$



де h_i – крок сітки по ξ , h_j – крок по η .

Позначимо

$$b_{ij}^{k+1} = \frac{a^2 \tau}{\left(\frac{x_{i+1,j}^{k+1} - x_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2 + \left(\frac{z_{i+1,j}^{k+1} - z_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2}. \quad (38)$$

Величина b_{ij}^{k+1} не змінюється під час ітерацій, залежить лише від конформної сітки на $k+1$ кроці по часу.

Для уточнення значення функції виразимо H_{ij}^{k+1} з рівняння (37).

$$H_{ij}^{k+1} = \frac{\left(H_{ij}^k + b_{ij}^{k+1} \left(\frac{H_{i+1,j}^{k+1} + H_{i-1,j}^{k+1}}{h_i^2} + \frac{H_{i,j+1}^{k+1} + H_{i,j-1}^{k+1}}{h_j^2} \right) \right)}{1 + 2b_{ij}^{k+1} \left(\frac{1}{h_i^2} + \frac{1}{h_j^2} \right)}. \quad (39)$$

Ітерації проводимо, поки максимальна різниця між значеннями функції на двох послідовних ітераціях більша від заданої точності ε . Але значення H_{ij}^k відоме в попередній момент часу на попередній сітці.

Для знаходження H_{ij}^k у вузлі (i, j) поточної сітки використаємо інтерполяцію по чотирикутнику попередньої сітки, в який потрапляє вузол (i, j) поточної сітки. Цю операцію потрібно проводити на початку $k+1$ кроку, бо сітка під час ітерацій, а отже, й розташування вузла (i, j) незмінні. Хоча недоліком ітераційного методу для параболічних рівнянь є проблема швидкодії, в даному випадку вона несуттєва, бо побудова ітераційним методом конформної сітки займає значно більше часу, ніж уточнення значення функції у її вузлах (при однаковій точності).

Розглянемо локально-одновимірну схему Самарського. Провівши різницеву апроксимацію рівняння (36) на кроці $k+0,5$, отримаємо

$$\frac{H_{ij}^{k+0,5} - H_{ij}^k}{0,5\tau} = \frac{a^2}{\left(\frac{x_{i+1,j}^k - x_{i-1,j}^k}{2h_i} \right)^2 + \left(\frac{z_{i+1,j}^k - z_{i-1,j}^k}{2h_i} \right)^2} \cdot \frac{H_{i+1,j}^{k+0,5} - 2H_{ij}^{k+0,5} + H_{i-1,j}^{k+0,5}}{h_i^2}. \quad (40)$$

Як видно з рівняння, ми не будемо сітку на половинному кроці по часу і нехтуємо різницею сіток на двох сусідніх кроках по часу. Крайові умови мають вигляд

$$H_{0j}^{k+0,5} = \frac{H_{0j}^k + H_{0j}^{k+1}}{2}, \quad H_{nj}^{k+0,5} = \frac{H_{nj}^k + H_{nj}^{k+1}}{2}, \quad (41)$$

де n – кількість кроків по ξ .

На $k+1$ кроці апроксимація рівняння (36) має вигляд

$$\frac{H_{ij}^{k+1} - H_{ij}^{k+0,5}}{0,5\tau} = \frac{a^2}{\left(\frac{x_{i+1,j}^{k+1} - x_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2 + \left(\frac{z_{i+1,j}^{k+1} - z_{i-1,j}^{k+1}}{2h_i} \right)^2} \cdot \frac{H_{i,j+1}^{k+1} - 2H_{ij}^{k+1} + H_{i,j-1}^{k+1}}{h_j^2}. \quad (42)$$

Крайові умови

$$H_{i0}^{k+1} = H_{i1}^{k+1}, \quad H_{im}^{k+1} = h(ih_i, (k+1)\tau), \quad (43)$$

де $h(x, t)$ – знайдений розв'язок задачі (9)-(12).

Розв'язок задачі на кроках $k+0,5$, $k+1$ знаходимо методом прогонки, $k \geq 0$.

Перевагами ітераційного методу над методом Самарського є врахування зміни сітки на послідовних кроках по часу, а також те, що зі зменшенням розмірів області Ω_1 при використанні ітераційного методу можна зменшувати кількість ліній сітки по вертикалі (кількість кроків по η).

Після проведення чисельних експериментів отримано наступні результати: значення зміщень, розраховані за методом, описаним нижче, при використанні трьох вище описаних способів знаходження напорів практично однакові (майже непомітні візуально, лінії поверхні землі в різні моменти часу накладаються). Крім того похибки не накопичуються з часом, тобто всі три результати практично



рівнозначні. Враховуючи те, що при великій кількості спрощуючих припущень знаходження зміщень не претендує на високу точність, можна зробити висновок про доцільність застосування простого і дуже швидкого методу на основі рівняння (34).

Рух вільної поверхні ґрунтових вод веде до виникнення різноманітних об'ємних сил і зміни НДС ґрунтового масиву [4]. Нерідко трапляється так, що інтенсивне пониження рівня ґрунтових вод призводить до виникнення в ґрунтових масивах значних осідань поверхні землі і, як наслідок цього, деформації будівель та споруд у вигляді тріщин, а іноді їх руйнування.

Розглянемо зміщення ґрунту в точці $x = x_1$ у момент часу $t = t_1$.

Для знаходження зміщень в областях ґрунтового масиву нижче рівня ґрунтових вод Ω_1 та вище рівня ґрунтових вод Ω_2 маємо систему диференціальних рівнянь

$$k_1 \frac{d^2 u_1}{dz^2} = \gamma_{sb} + \gamma_w \left(\frac{dh}{dz} - 1 \right), x \in (0, l_1), \quad (44)$$

$$k_2 \frac{d^2 u_2}{dz^2} = \gamma_n, x \in (l_1, l), \quad (45)$$

$$u_1(0) = 0, \quad (46)$$

$$\frac{du_2(l)}{dz} = 0, \quad (47)$$

$$u_1(l_1) = u_2(l_1), \quad (48)$$

$$k_1 \frac{du_1(l_1)}{dz} = k_2 \frac{du_2(l_1)}{dz}, \quad (49)$$

де γ_{sb} – питома вага ґрунту, що знаходиться у зваженому стані; γ_n – питома вага ґрунту, що знаходиться у природному стані; γ_w – питома вага води; $h(z)$ – напір у точці (x_1, z) на момент часу t_1 ; $k_1 = \lambda_1 + 2\mu_1$, $k_2 = \lambda_2 + 2\mu_2$ – пружні сталі; $u_1(z), u_2(z)$ – зміщення точки, яка у момент t_1 знаходиться у точці (x_1, z) ; l_1 – рівень ґрунтових вод, а l – шукана вертикальна координата верхньої точки ґрунтового масиву в точці $x = x_1$ у момент часу $t = t_1$; індекси 1, 2 біля k, λ, μ, u означають розміщення точки (x_1, z) нижче або вище РГВ відповідно.

Інтегруючи рівняння (44), (45), отримуємо

$$\frac{du_1}{dz} = \frac{\gamma_{sb} z}{k_1} + \frac{\gamma_w}{k_1} (h(z) - z) + c_1, \quad (50)$$

$$u_1 = \frac{\gamma_{sb} z^2}{2k_1} + \frac{\gamma_w}{k_1} \left(\int_0^z h(\xi) d\xi - \frac{z^2}{2} \right) + c_1 z + c_2, \quad (51)$$

$$\frac{du_2}{dz} = \frac{\gamma_n z}{k_2} + c_3, \quad (52)$$

$$u_2 = \frac{\gamma_n z^2}{2k_2} + c_3 z + c_4, \quad (53)$$

Підставляючи (51) у (46), отримуємо

$$c_2 = 0.$$

Підставляючи (52) у (47), отримуємо

$$c_3 = -\frac{\gamma_n l}{k_2}. \quad (54)$$

Із (49), (50), (52), (54) маємо

$$\gamma_{sb} l_1 + \gamma_w (h(l_1) - l_1) + c_1 k_1 = \gamma_n l_1 - \gamma_n l.$$

Враховуючи, що $h(l_1) = l_1$, отримаємо

$$c_1 = \frac{1}{k_1} (\gamma_n (l_1 - l) - \gamma_{sb} l_1).$$

Підставляючи в (48) (51), (53), знайдені константи c_1, c_2, c_3 , маємо



$$\begin{aligned} \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2k_1} + \frac{\gamma_w}{k_1} \left(\int_0^{l_1} h(\xi) d\xi - \frac{l_1^2}{2} \right) + c_1 l_1 &= \frac{\gamma_n l_1^2}{2k_2} - \frac{\gamma_n l_1 l}{k_2} + c_4, \\ c_4 &= \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2k_1} + \frac{\gamma_w}{k_1} \left(\int_0^{l_1} h(\xi) d\xi - \frac{l_1^2}{2} \right) + \frac{l_1}{k_1} (\gamma_n (l_1 - l) - \gamma_{sb} l_1) - \frac{\gamma_n l_1^2}{2k_2} + \\ &+ \frac{\gamma_n l_1 l}{k_2} = \frac{1}{k_1} \left(\gamma_w \int_0^{l_1} h(\xi) d\xi - \frac{\gamma_w l_1^2}{2} - \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2} + \gamma_n (l_1^2 - l_1 l) \right) + \frac{\gamma_n l_1}{k_2} \left(l - \frac{l_1}{2} \right). \end{aligned}$$

Оскільки ми враховуємо всі фактори тиску на ґрунт, зміщення знаходяться відносно деякого початкового рівня l_0 . Цей початок відліку необхідно знайти, використовуючи відоме в початковий момент значення l .

$$u_2(l) = l - l_0, \quad (55)$$

Із (53), (54) отримаємо

$$u_2(l) = \frac{\gamma_n l^2}{2k_2} - \frac{\gamma_n l^2}{k_2} + c_4 = -\frac{\gamma_n l^2}{2k_2} + c_4. \quad (56)$$

Підставляючи (55), знайдене значення c_4 у рівняння (56), отримаємо

$$l_0 = l + \frac{\gamma_n l^2}{2k_2} - \frac{1}{k_1} \left(\gamma_w \int_0^{l_1} h(\xi) d\xi - \frac{\gamma_w l_1^2}{2} - \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2} + \gamma_n (l_1^2 - l_1 l) \right) - \frac{\gamma_n l_1 l}{k_2} + \frac{\gamma_n l_1^2}{2k_2}. \quad (57)$$

Підставивши в отриману формулу значення відомих величин у початковий момент часу, знайдемо l_0 .

Для знаходження l у будь-який момент часу з (57) отримуємо квадратне рівняння:

$$\left(\frac{\gamma_n}{2k_2} \right) l^2 + \left(\frac{\gamma_n l_1}{k_1} + 1 - \frac{\gamma_n l_1}{k_2} \right) l + \left(-l_0 + \frac{\gamma_n l_1^2}{2k_2} + \frac{1}{k_1} \left(-\gamma_w \int_0^{l_1} h(\xi) d\xi + \frac{\gamma_w l_1^2}{2} + \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2} - \gamma_n l_1^2 \right) \right) = 0. \quad (58)$$

Розв'язавши квадратне рівняння (58), знайдемо вертикальну координату деформованої верхньої межі ґрунту для довільних значень x і t .

$$\begin{aligned} l &= \frac{k_2}{\gamma_n} \left(-1 + \gamma_n l_1 \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) + \left(\left(-1 + \gamma_n l_1 \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) \right)^2 - \left(\frac{2\gamma_n}{k_2} \right) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left(-l_0 + \frac{\gamma_n l_1^2}{2k_2} + \frac{1}{k_1} \left(-\gamma_w \int_0^{l_1} h(\xi) d\xi + \frac{\gamma_w l_1^2}{2} + \frac{\gamma_{sb} l_1^2}{2} - \gamma_n l_1^2 \right) \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (59)$$

Ми вибрали знак “+” перед коренем квадратним з урахуванням того, що $l > 0$.

Для знаходження інтегралу від функції напору $\int_0^{l_1} h(\xi) d\xi$ використаємо побудовану конформну сітку.

Алгоритм знаходження інтегралу в точці $x = x_1$ у момент часу $t = t_1$ можна записати таким чином. На конформній сітці для часу $t = t_1$ проводимо вертикальну пряму $x = x_1$. У точках перетину цієї прямої з лініями $\eta = \text{const}$ сітки знаходимо значення напору за допомогою лінійної інтерполяції між сусідніми вузлами. Знаходимо інтеграл за допомогою формули центральних прямокутників для нерівномірно розміщених вузлів. Цей алгоритм просто реалізується на мові програмування з використанням аналітичної геометрії.

Для прикладу виконано числові розрахунки при наступних вхідних даних:

$$\lambda_1 = 25220 \text{ кг} / \text{м}^2; \lambda_2 = 30000 \text{ кг} / \text{м}^2; \mu_1 = 16800 \text{ кг} / \text{м}^2; \mu_2 = 20000 \text{ кг} / \text{м}^2; \mu = 0,15;$$

$$k_x = k_z = 0,5 \text{ м} / \text{добу}; \gamma_{np.} = 16,5 \text{ кН} / \text{м}^3; \gamma_w = 9,8 \text{ кН} / \text{м}^3; L = 100 \text{ м}; l(x, 0) = 40 \text{ м}; V_0 = 0,1 \text{ м} / \text{добу};$$

$$V_1 = 0,2 \text{ м} / \text{добу};$$

Результати обчислень наведені на рис. 2-4, на яких показано поверхню ґрунту та гідродинамічну (або конформну) сітку на початковий момент часу та через 36 і 72 доби після пониження рівня води в горизонтальних дренах. Із рисунків видно, що разом зі зниженням рівня ґрунтових вод відбувається осідання поверхні ґрунтового масиву.

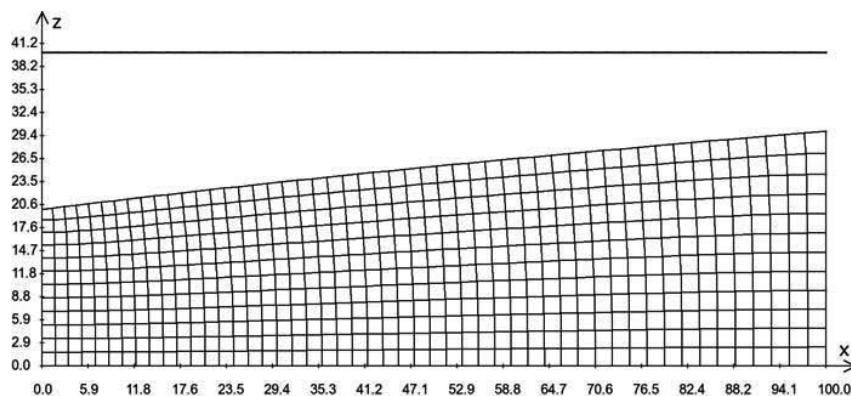


Рис. 2. Поверхня ґрунтового масиву та гідродинамічна сітка в початковий момент часу $t = 0$

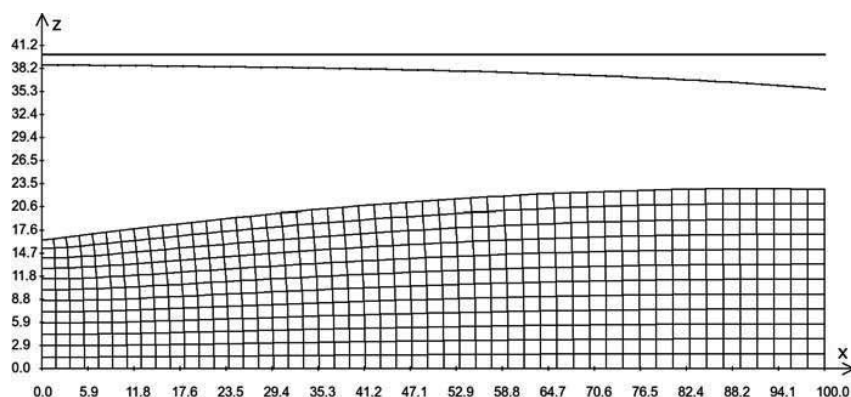


Рис. 3. Поверхня ґрунтового масиву та конформна сітка при пониженні рівня води в горизонтальних дренах на момент часу $t = 36$ діб

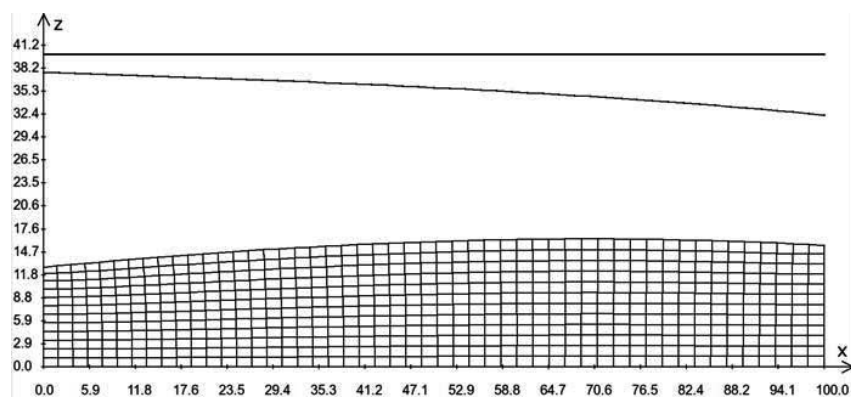


Рис. 4. Поверхня ґрунтового масиву та конформна сітка при пониженні рівня води в горизонтальних дренах на момент часу $t = 72$ доби

Висновки. В даній роботі було розглянуто лише одну з багатьох інженерних задач оцінки напружено-деформованого стану водонасиченого ґрунтового масиву в процесі його осушення шляхом відкачування води з горизонтальних дренах. Розглянуто двовимірну математичну модель, що у багатьох випадках може відповідати вимогам практики. У даній роботі було значно спрощено математичні моделі процесів фільтрації, що, безумовно, впливає на точність визначення НДС. Виконані числові експерименти показують вплив пониження рівня ґрунтових вод на НДС.

Розглянуту задачу можна розширювати для врахування різноманітних факторів, що дозволить отримати точніший розв'язок. Простий розв'язок, що розглянутий в даній роботі, має перевагу в можливості знаходження НДС ґрунтового масиву в будь-який окремий момент часу без знаходження НДС в попередні моменти часу. Подальшим дослідженням у даному напрямку є отримання відповідних рішень для багат шарових ґрунтових масивів.

Література

1. Сергиенко И.В., Скопецкий В.В., Дейнека В.С. Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах. – К.: 1991. – 432 с.





2. Власюк І.А., Кузло М.Т. Математичне моделювання напружено-деформівного стану ґрунтових масивів у процесі руху вільної поверхні// Тез. Всеукр. наук. конф. “ Сучасні проблеми прикладної математики та інформатики ”. – Львів, 2004. – С. 36.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
4. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. –М.: Высш. шк., 1991. – 447 с.



УДК 624.042

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор, академик РАТ, Зинченко Е.В. инженер

ПРОБЛЕМА УСТРОЙСТВА ГИДРОИЗОЛЯЦИИ И ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ С БОЛЬШИМИ ПРОДОЛЬНЫМИ УКЛОНАМИ

Мостовые сооружения являются сложными инженерными объектами, надежность эксплуатации которых зависит и от их правильного конструирования, и от правильного подбора материалов, применяемых при их строительстве. Неудовлетворительное состояние проезжей части мостового полотна мостов является одной из причин разрушения бетона, находящегося ниже мостового полотна и сокращения срока службы конструктивных элементов, а также коррозии металла плит проезжей части. Поэтому при строительстве мостов возникает проблема устройства качественной дорожной одежды (мостового полотна). Эти проблемы возникают при устройстве дорожной одежды не по привычному грунтовому основанию, а по плите проезжей части, которая имеет свои, отличные от обычного грунтового дорожного основания, жесткостные характеристики.

Следствием является неправильное выполнение конструкции покрытия и гидроизоляции, проникновение сквозь них нежелательной влаги, приводящей к коррозии и преждевременному разрушению плит проезжей части.

Одним из важнейших элементов мостового полотна, обеспечивающих потребительские свойства мостового сооружения, является дорожная одежда, от конструкции и качества выполнения которой зависят и долговечность мостового полотна, и удобство и безопасность движения по мосту.

Общие конструктивные требования к дорожной одежде мостового сооружения сводятся к следующему:

- обеспечение плавного и безопасного движения, выполнение защитных функций от атмосферных и других внешних воздействий;
- сохранение назначенных геометрических форм и размеров в течение всего срока службы моста;
- достаточная прочность и жесткость для восприятия всех видов нагрузок; максимально легкий вес;
- долговечность, равная сроку службы других элементов моста, легкая заменяемость во время ремонтов;
- экономичность.

Проблема разработки конструкций и технологий устройства дорожной одежды, обеспечивающих долговечность, соизмеримую со сроком службы пролетных строений, является весьма актуальной.

Обследование и анализ существующих конструкций дорожной одежды (мостового полотна) подавляющего большинства автодорожных мостов России показывают, что традиционно применяемые конструкции дорожной одежды и технологии их выполнения не обеспечивают требуемой долговечности. Положение усугубляется тем, что, кроме экстремальных воздействий подвижного состава, имеют место климатические и агрессивные воздействия, особенно в осенне-зимний период при борьбе с гололедом песчано-солевыми растворами. Все это приводит к необходимости переустраивать дорожные одежды через 5-7 лет, а то и раньше.

В качестве дорожного покрытия на мостах, особенно большепролетных, раньше часто использовался дорожный асфальтобетон, соответствующий требованиям ГОСТ 9128-97.

В то же время основание в виде металлической ортотропной плиты пролетного строения моста или в виде железобетонной плиты проезжей части моста и условия эксплуатации, отличающиеся от дорожных, требуют назначения особых конструкций дорожных одежд и применения асфальтобетонных смесей, соответствующих специфике этих конструкций.

Тем не менее, в России, как материалы, так и конструкции для дорожных одежд на мостах в большинстве случаев применялись, аналогичные автомобильным дорогам. Поэтому неудивительно, что сроки службы таких асфальтобетонных покрытий на мостах часто оказывались значительно короче, чем на автомобильных дорогах. Так на некоторых крупных мостах России ресурс долговечности дорожных покрытий уже через 3-4 года эксплуатации составляет 50-60%, в то время как в Дании они на аналогичных мостах служат при соответствующем содержании до 15-20 лет, а в Германии есть примеры и более длительного срока службы.

За рубежом это стало возможным в результате использования специально проектируемых составов асфальтобетонных смесей, которые не применяются для дорожных покрытий. При этом предъявляемые к ним требования учитывают максимальную и минимальную температуру эксплуатации, динамические напряжения в асфальтобетоне, его пластические и упругие свойства, а проектирование его состава ведется



по специально разработанной методике. Кроме того, предусматривается строгий режим эксплуатации и содержания таких покрытий на мостах, на порядок более жесткий, чем на дорогах.

Однако критерии выбора конструкций дорожной одежды для металлических и сталежелезобетонных мостов пока еще не разработаны.

Специалисты в области проектирования, строительства и оценки состояния мостовых сооружений и автомобильных дорог за рубежом создают совместные коллективы для строительства дорожных одежд на мостах.

В тех случаях, когда специалистам в области мостовых конструкций и автомобильных дорог удается достичь взаимопонимания, дорожные одежды на мостовых конструкциях по долговечности и экономичности близки, а иногда и превосходят таковые на автомобильных дорогах. Например, в Германии срок службы асфальтобетонной одежды на металлическом вантовом мосту без капитального ремонта превысил 30 лет.

К сожалению, в России специалисты мостовики и дорожники в силу ряда причин разобщены и им не всегда удается достичь взаимопонимания. Итогом этого часто является назначение на мостах неоправданно завышенных толщин дорожной одежды, выбор не отвечающих специфике работы на мостах материалов, трудности с устройством дорожной одежды, проведением ремонтов и содержания.

И если в зарубежной литературе появляются совместные работы специалистов мостовиков и дорожников, то в России их практически нет.

Однако без выработки одинакового подхода таких специалистов к конструированию дорожных одежд и всей системы в целом невозможно повысить долговечность нежестких покрытий на мостах и уменьшить толщины асфальтобетонных покрытий, а также разработать методику расчета дорожных одежд на них.

Еще одной важной причиной, затрудняющей выбор наиболее эффективных конструкций дорожной одежды на мостах, является стремление фирм, предлагающих эти конструкции дорожных одежд, характеризовать их наиболее эффективные области применения, но не указывать случаи неудовлетворительного применения гидроизоляции и дорожной одежды, а предлагать свои конструкции чуть ли не на все случаи жизни. Далее мы покажем, что область применения многих дорожных конструкций на мостовых сооружениях ограничена и потому к их применению следует относиться с осторожностью. И, наконец, анализ показывает, что достаточно надежных и длительных исследований поведения дорожных конструкций и **гидроизоляции на мостах** не так уж и много, поэтому изучение и использование опыта положительного применения таких конструкций оправдано.

Рассмотрим состояние проезжей части на одной из эстакад обхода города Сочи. Конструктивное решение дорожной одежды на рассматриваемом участке проезжей части эстакады показано на рис. 1, а на тротуаре на рис. 2.

Щебеночно-мастичный асфальтобетон ШМА - 20 50 мм
Асфальтобетон (мелкозернистый плотный, тип Б марки 1) 60 мм
Гидроизоляция «Полиуреа» 6 мм
Железобетонная плита проезжей части 220 мм

Рис. 1. Схема устройства дорожной одежды на плите проезжей части

Асфальтобетон (мелкозернистый плотный, тип Б марки 1) 50 мм
Асфальтобетон (мелкозернистый плотный, тип Б марки 1) 60 мм
Гидроизоляция «Полиуреа» 6 мм
Железобетонная плита проезжей части 220 мм

Рис. 2. Схема устройства дорожной одежды на тротуаре

Как видно, при устройстве дорожной одежды применены следующие инновационные решения: использование нового типа гидроизоляции «Полиуреа», использование щебеночно-мастичного асфальтобетона ШМА-20.

Особенностями участка, на котором устраивалась дорожная одежда данного типа, и которые были известны при проектировании дорожной одежды, являются:



- наличие большого уклона проезжей части, составляющего 60 промилле (или 6%);
- наличие большой интенсивности движения,
- действие значительных тормозных сил от автомобилей,двигающихся под уклон;
- наличие центробежных сил при расположении отдельных зон участка на кривых.

Слой плотного асфальтобетона на гидроизоляцию «Полиуреа» начали укладывать в конце августа 2009 года с проливом подгрунтовки из битумной эмульсии. Но во время подачи асфальта происходил отрыв гидроизоляции от бетона, поэтому работы по укладке остановили. Через неделю приняли решение укладывать слой асфальтобетона на гидроизоляцию без подгрунтовки. Перед укладкой верхнего слоя из ЩМА долго решали, фрезеровать или не фрезеровать уже уложенный слой асфальтобетона, поэтому до укладки ЩМА прошел еще месяц.

Окончательную укладку ЩМА проводили в конце сентября 2009 года, а сдачу в декабре 2009 года.

Однако оказалось, что в процессе эксплуатации дорожная одежда на эстакаде ведет себя не совсем так, как предполагалось в проекте.

Первые повреждения на дорожной одежде стали появляться практически через год в конце лета 2010 года после жарких августовских дней. Асфальт стал сдвигаться по гидроизоляции, приводя к появлению разрывов раскрытием до 10 см.

При обследовании проезжей части эстакады в сентябре 2010 года, были выявлены следующие повреждения проезжей части (рис. 3):

- дугообразная трещина длиной 5,0 м с раскрытием до 10 см и наплыв по кромке проезжей части;
- локальные деформации проезжей части в виде наплывов и волн;
- дугообразная трещина длиной 1,5 м с раскрытием до 8 см и наплыв по кромке проезжей части.



а)



б)

Рис.3. Повреждения дорожной одежды: а) S-образная трещина; б) раскрытие трещины

Наиболее вероятные причины появления и развития обнаруженных повреждений:

- большие продольные и поперечные уклоны;



- зона торможения;
- наличие центробежных сил на кривых;
- отсутствие сцепления пакета асфальтобетонных слоев с гидроизоляцией;
- высокие температуры окружающей среды и интенсивность движения;
- возможный пропуск сверхнормативных нагрузок.

Кроме того, следует иметь в виду, что дорожная одежда на мостовом сооружении деформируется не только от действия колес движущегося транспорта, но и от совместной работы с пролетным строением и испытывает динамические воздействия и от колебаний пролетного строения при прохождении транспорта.

В марте и начале апреля 2011 года было проведено повторное освидетельствование дорожной одежды на эстакаде рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Развитие повреждений на дорожной одежде эстакады

Анализ фотографий показывает, что имевшиеся ранее повреждения дорожной одежды получили дальнейшее развитие. К причинам этих повреждений, вдобавок к вышеуказанным при освидетельствовании в сентябре 2010 года можно отнести и не совсем правильную конструкцию дорожной одежды и, в определенной степени, не совсем обоснованное применение гидроизоляции «Полиуреа», не обеспечивающей ее сцепление с нижележащей плитой проезжей части и вышележащим слоем асфальтобетона.

Так как в процессе эксплуатации дорожная одежда с повреждениями подвергалась воздействию дождевых осадков, то через имеющиеся повреждения вода могла проникнуть в нижележащие слои дорожной одежды (асфальтобетон) и под влиянием колебательного динамического нагружения пролетных строений совместно с дорожной одеждой проходящим транспортом, прокачиваться по нижнему слою



дорожной одежды на значительные расстояния от места образования повреждения. Наличие влаги в нижнем слое дорожной одежды может привести к его последующему разрушению.

Что же за гидроизоляция «Полиуреа», примененная на эстакаде?

Как говорится в статье «Лучше ГОСТа», опубликованной в «Строительном эксперте» №7 (290), 20.04.2009 «Полиуреа» относится к полимочевинным материалам, которые, по утверждениям автора статьи, занимают лидирующее положение в мире как защитные антикоррозионные и гидроизоляционные покрытия несущих и функциональных конструкций инженерных сооружений любого назначения.

Система гидроизоляции «Полиуреа» была разработана ООО «РесурсСтрой», по утверждению которого она представляет собой высокоэффективный, долговечный материал, образующий гибкую, прочную, эластичную монолитную мембрану с хорошей стойкостью к воздействию водной и агрессивной химической среды (нефтепродукты, соли, кислоты). Бесшовное изолирующее покрытие образует сухую на отлип поверхность менее чем через 30 сек. после его напыления. Материал характеризуется высокой адгезией, эластичностью, прочностью на разрыв. В отличие от традиционных систем гидроизоляции полимочевинная мембрана обладает надежностью на стыках и при пропусках коммуникаций. Эластомер не содержит растворителей, летучих органических соединений. Материал имеет высокую температурную стойкость и рабочую температуру от -40 до +150°C с кратковременным повышением температуры до +220°C. Благодаря практически мгновенному гелеобразованию материал можно наносить однократно любой толщины, включая вертикальные и потолочные поверхности.

Лабораторией ОАО ЦНИИС в 2003 г. были проведены исследования и испытания данной системы, и составлено соответствующее заключение.

В частности, в этом заключении указывается, что «Лаборатория новых строительных материалов, гидроизоляции и антикоррозионной защиты» рекомендует материал «Полиуреа» для гидроизоляции мостов, тоннелей, водопропускных труб, а также при необходимости для производства герметизирующих мембран с геотекстильными на основе полипропилена, тканями в качестве гидроизоляции различных конструкций в промышленном и транспортном строительстве с высокими показателями по качеству и производительности труда. Там же отмечается, что «В настоящее время имеется положительный опыт применения системы гидроизоляции «Полиуреа» компании «РесурсСтрой» в транспортном строительстве на следующих объектах: внутригородская кольцевая магистраль от Звенигородского шоссе до Беговой ул., подземный пешеходный переход на Варшавском шоссе, транспортная эстакада на объекте Москва – Сити, реконструкция Киевского шоссе, мост через реку Ликова, 2-я очередь и реку Незнайка и т.д.».

Как мы полагаем на основании этих и других данных во время заседания Научно-технического совета комплекса градостроительной политики и строительства города Москвы 20 февраля 2009 года (протокол № 1/09) рассматривался, в том числе, и вопрос «О применении в московском строительстве высокотехнологичной системы гидроизоляции "Полиуреа" производства ООО "РесурсСтрой"». Рецензенты дали положительный отзыв по вопросу применения полимочевинных материалов, отметив при этом положительный опыт применения таких материалов за границей, а так же, в качестве тестов, при строительстве некоторых московских объектов. Полимочевинные материалы, используются в строительстве как защитные антикоррозионные и гидроизоляционные покрытия несущих и функциональных конструкций.

Решение научно-технического совета:

1. Принять к сведению информацию генерального директора ООО "РесурсСтрой" И.Г. Гамбаровой о разработанной ООО "РесурсСтрой" системе гидроизоляции "Полиуреа".

2. Отметить существенные преимущества системы по сравнению с применяемыми материалами для гидроизоляции по показателям прочности, эластичности, адгезии и долговечности. Применение системы "Полиуреа" обеспечивает надежность и увеличение сроков безремонтной эксплуатации объектов, а также существенное сокращение сроков производства работ.

3. ООО "РесурсСтрой" совместно с МГГУ разработать технологию применения и провести испытания системы "Полиуреа" для проведения работ по гидроизоляции при строительстве тоннелей.

4. Учитывая многолетний положительный опыт применения системы "Полиуреа" и сертификацию системы "Стинстройсертификацией", рекомендовать применение системы гидроизоляции "Полиуреа- на строительных объектах г. Москвы для гидроизоляции бетонных и металлических конструкций в транспортном строительстве.

Казалось бы, все нормально, гидроизоляция принята на «ура», рекомендована к повсеместному применению.

Но, при внимательном изучении ряда материалов между строк можно прочитать и некоторую информацию, которая наводит на размышления.

Нигде, повторяем, нигде нет четкого указания о возможности применения этой гидроизоляции в дорожных одеждах на пролетных строениях мостовых сооружений. Мало того, нередко даже забывается,





что гидроизоляция на пролетных строениях должна отличаться от гидроизоляции крыш, фундаментов, и даже тоннелей тем, что в случае использования в составе дорожных одежд на мостовых сооружениях гидроизоляция подвергается комплексу совсем иных воздействий, как в процессе строительства (при укладке на нее горячей асфальтобетонной смеси), так и в процессе эксплуатации.

Например, на сайте фирмы «Гермострой» четко говорится об области применения гидроизоляционных полимочевинных материалов: гидроизоляция и защита от коррозии сложных и динамичных железобетонных конструкций: плоские кровли, террасы, балконы, бассейны, резервуары, стадионы, мосты, подвалы, подземные сооружения и туннели; гидротехнические сооружения, градирни, каналы; гидроизоляция под стяжку и плитку. Применяется как защитное покрытие для полов с легкими нагрузками – паркинги и гаражи. Заполнение и запечатывание трещин и швов. В качестве защитного и антикоррозионного покрытия металла и металлоконструкций. Для наружных и внутренних работ.

Обратим внимание на одно обстоятельство – возможность ее использования как защитного покрытия для полов с легкими нагрузками – паркинги и гаражи. На пролетных строениях мостовых сооружений нагрузки отличаются и величиной и динамичностью и различным направлением действия, а сами пролетные строения весьма тяжелыми условиями работы.

Заключение. Предполагаемые причины повреждений на дорожной одежде мостового полотна, не совсем правильная конструкция дорожной одежды для данных условий; не совсем обоснованное применение гидроизоляции «Полиуреа», не обеспечивающей ее сцепление, как с бетоном плиты проезжей части, так и с вышележащим слоем асфальтобетона, а также нарушение технологии устройства дорожной одежды с использованием гидроизоляции «Полиуреа».



УДК 624.042

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор, академик РАТ, **Зинченко Е.В.** инженер

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ УСТРОЙСТВА ГИДРОИЗОЛЯЦИИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ НА МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ С ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ

Предварительный анализ показывает, что понятие «гидроизоляция» используется не всегда верно, особенно применительно к пролетным строениям мостовых сооружений. Ведь на пролетном строении гидроизоляция выполняет не только функцию защиты нижележащих конструкций от проникания влаги, но и работает в составе дорожной одежды, и потому должна обеспечивать совместную работу ее слоев как ниже, так и выше гидроизоляции. То есть гидроизоляция должна быть прочной, деформативной, обеспечивать сцепление с ниже и выше расположенными слоями дорожной одежды. А так как на дорожную одежду действует временная нагрузка, то гидроизолирующий слой должен воспринимать действие этой нагрузки.

К сожалению, фирмы, предлагающие свою гидроизолирующую продукцию, не любят распространяться о недостатках своей продукции. Поэтому информация, получаемая от фирм, не всегда объективна и не всегда четко документирована. Для исправления сложившейся ситуации далее рассмотрим некоторую не столько положительную, сколько отрицательную информацию об особенностях поведения и гидроизоляции и дорожных одежд на мостовых сооружениях.

В качестве первого примера рассмотрим устройство гидроизоляции и дорожной одежды на мосту через реку Ликова.

Согласно Технологическому регламенту на производство гидроизоляционных работ на мосту через реку Ликова гидроизоляция представляет собой систему из двух слоев – праймера «Унипрайм – 2К» и гидроизоляции из мастично - полимерного материала «Полиуреа» по ТУ 5775-019-01393674-03.

Мост через реку Ликова на Боровском шоссе сталежелезобетонный трехпролетный. Дорожная одежда после железобетонной плиты следующая: выравнивающий слой (5 см), гидроизоляция «Полиурет», защитный слой асфальта 5 см, и далее асфальт в 2 слоя 7 и 5 см. Некоторые результаты обследования состояния дорожной одежды, устроенной по упомянутой гидроизоляции приведены на фотографиях (Рис.1).



А)





Б)

Рис. 1. Состояние дорожной одежды и гидроизоляция на мосту через реку Ликова.

Возможными причинами такого явления по версии ГУП «Гормост» могут быть:

- недостаточная толщина укладки асфальтобетона, в результате чего образовались выбоины до изоляции; (действительно, по проекту должно быть $5+7+5=17$ см, а судя по фото, толщина значительно меньше);
- недостаточный контроль за укладкой асфальтобетонного защитного покрытия (высокая температура укладки асфальтобетона, в результате вздутие и сдвиг изоляционного слоя, разрушение асфальта); но по рекламируемым данным диапазон рабочих температур для полимочевины от минус 40°C до плюс 180°C ; по другим данным рабочие температуры эксплуатации системы «Полиуреа» от -50 до $+150^{\circ}\text{C}$, с кратковременным повышением температуры до $+220^{\circ}\text{C}$;
- локальная недостаточная адгезия гидроизоляции (сдвиг и нарушение).

К сожалению, информация о таких последствиях «эффективного» применения гидроизоляции не находится в открытом доступе.

Но, по всей видимости, некоторая информация о не всегда положительном поведении дорожной одежды с гидроизоляцией «Полиуреа», привела к появлению письма ЗАО «Институт «Стройпроект», в котором высказывается мнение специалистов «Стройпроекта» о надежности и долговечности дорожных покрытий на мостовых сооружениях. В частности, там говорится следующее:

«Эксплуатационная надежность и долговечность асфальтобетонных дорожных покрытий в значительной степени зависит не только от прочности материалов слоев покрытия, но и от совместности работы этих слоев. Особенно важное значение приобретают условия контакта на границах слоев при тонких и сверхтонких слоях покрытия и недостаточно прочном основании.

В настоящее время обеспечение связи между слоями покрытия осуществляется двумя основными способами: методом приклеивания (в том числе путем повышения содержания вяжущего в материале одного из слоев или путем дополнительного розлива вяжущего между слоями) и методом зацепления (в результате зацепления частиц верхнего слоя за выступающие частицы нижнего слоя).

Метод приклеивания (основанный на адгезии) обеспечивает восприятие покрытием главным образом вертикально действующих сил (например, при прогибе дорожной одежды под колесом автомобиля). Метод зацепления обеспечивает восприятие покрытием главным образом горизонтальных нагрузок (возникающих при торможении автомобилей или движении их на участках со значительными продольными уклонами).

Для мостовых дорожных покрытий, располагающихся на прочном основании в виде железобетонной плиты такие критерии прочности, как величина упругого прогиба и т.п. не актуальны. Основные воздействия, которым подвергаются мостовые покрытия (наряду с износом колесами автомобилей) сдвиговые. Причем особенно велики сдвигающие усилия в слоях покрытия на глубине 4-7 см.



В нижележащих слоях покрытия из-за распределяющей способности материала покрытия они снижаются в 2-2,5 раза и более.

Учитывая специфику работы мостового дорожного покрытия, считаем наиболее важным обеспечить, в первую очередь, сдвиговую прочность в зоне контакта между асфальтобетоном нижнего слоя и гидроизоляцией. Поскольку в силу особенностей химического состава наливной гидроизоляции «Полиуреа» адгезия битума и битумных материалов к ней низка, целесообразно обеспечивать восприятие сдвигающих напряжений путем зацепления шероховатой поверхности гидроизоляции со слоем асфальтобетона. Для создания шероховатой поверхности по свежесуложенному слою «Полиурии» рассыпается зернистый материал (крупный песок или мелкий щебень) и закрепляется повторным распылением «Полиурии».

Розлив битумной эмульсии или жидкого битума, являющийся обычной практикой дорожного строительства, в данном случае может привести к заполнению вяжущим впадин между выступами на поверхности гидроизоляции и ухудшить условия зацепления между слоями.

Кроме того, по данным РосдорНИИ (Л.А. Горельшева) не полностью распавшаяся эмульсия в процессе дальнейшего распада в пленке между слоями может вызывать в покрытии значительные остаточные напряжения, ухудшающие прочность контакта. Исходя из вышеизложенного, считаем допустимым применить в данном случае нормативные требования п.10.17 СНиП 3.06.03-85, согласно которому обработку нижнего слоя вяжущим можно не производить в случае, если интервал между устройством верхнего и нижнего слоев составляет не более 2 суток и отсутствовало движение построечного транспорта.

Действующими в настоящее время российскими национальными техническими нормами величина прочности сцепления (при сдвиге) или адгезии (при отрыве) между слоями асфальтобетонного покрытия или между нижним слоем покрытия и основанием количественно не нормируется. Отсутствуют также и стандартные методики измерения этих показателей. Единственной зарубежной страной, где этот вопрос решен, является Швейцария. Там действуют нормы SN671961, предусматривающие методику лабораторного измерения максимального сдвигающего усилия между слоями составного образца асфальтобетона. Однако проведение подобного испытания применительно к паре «асфальтобетон – гидроизоляция» Швейцарскими нормами также не предусмотрено, и проведение такого испытания потребует разработки специальной методики и оборудования.

Учитывая, что контакт между верхним и нижним слоями асфальтобетонного покрытия расположен в зоне наибольших сдвигающих усилий, особое внимание при производстве работ следует уделить обеспечению сцепления и адгезии между верхним и нижним слоями дорожного покрытия. При этом необходимо в обязательном порядке производить розлив органического вяжущего по нормам СНиП 3.06.03-85».

Что же касается гидроизоляции фирмы «Sika», то здесь также имеется информация об отрицательном опыте ее применения. Например, на мосту через реку Волга в Астрахани гидроизоляция этой фирмы через 1,5 года перестала выполнять свои функции. Гидроизоляция фирмы «Sika» на мосту через Волгу в Казани продержалась 2,5 года. При вскрытии дорожной одежды для ремонта обнаружилось разрушение гидроизоляции, особенно в зоне около столиков под стойки барьерного ограждения.

На сталежелезобетонных мостовых сооружениях через реки Малая Каюковка и Большая Каюковка на мостовом переходе через Волгу у села Пристанное Саратовской области устраивалось асфальтобетонное покрытие с применением для верхнего слоя покрытия литого асфальтобетона с модифицированным битумом, но гидроизоляция на этих мостах выполнялась с использованием материала «мостопласт».

Конструкция дорожной одежды мостового полотна при использовании гидроизоляции «мостопласт» следующая (рис. 2):



литой асфальт I, II; 40 мм
асфальтобетон I (А, В); 40 мм
сетка Hatelit; 5 мм
защитный слой бетона; 35 мм
гидроизоляционный слой "Мосто-пласт"; 5 мм
раствор выравнивающего слоя; 40 мм
сборные железобетонные плиты проезжей части

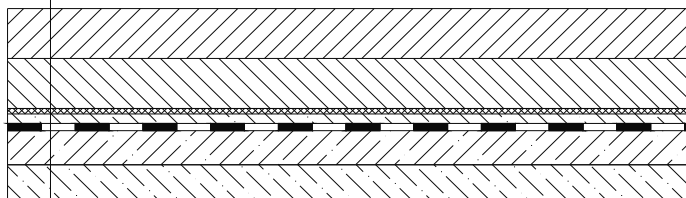


Рис.2. Конструкция дорожной одежды мостового полотна на мостах через реки Малая и Большая Каюковки (сталебетонные пролетные строения)

В процессе эксплуатации этой конструкции было выявлено следующее. На этих сталебетонных мостах произошла деформация литого асфальтобетона. Как отмечалось выше, на этих мостах была использована оклеечная гидроизоляция,

На первом из мостов в выравнивающем бетонном слое толщиной от 0 до 30 мм имели место сдвиговые деформации. Со временем перепады летних и зимних температур, а также вибрация от движения транспортных средств привели к отслаиванию тонкого выравнивающего слоя бетона, а сцепление слоя мастики с бетонной поверхностью ослабло. Как следствие из-за эластичности литого асфальтобетона образования трещин на покрытии не произошло, но слой литого асфальтобетона пришел в движение, что привело к образованию вмятин и пузырей (Рис. 2 и 3).



Рис.2. Образование неровностей на проезжей части сталебетонного моста при использовании рулонной гидроизоляции «Мосто-пласт»



Рис. 3. Образование вмятин и пузырей на проезжей части моста

Кроме того, следует учитывать, что влажность поверхности бетона и недостаточное качество его очистки оказали существенное влияние на адгезию мастики к поверхности бетона. В нашем случае сцепление слоя мастики с бетонной поверхностью оказалось недостаточным, в результате через некоторое время появились сдвиги в покрытии. На сцепление со слоем мастики также оказало влияние отсутствие дренажных труб, в связи с чем влага, содержащаяся в новом бетонном слое, не получила возможность выхода наружу, между слоем мастики и бетонной поверхностью образовались паровые подушки, что еще более усилило степень отслоения мастики от поверхности бетона.

На втором мосту также была уложена рулонная гидроизоляция. В процессе производства работ спустя неделю после устройства железобетонной плиты проезжей части поверхность бетона была покрыта эмульсией и слоем асфальта АВ на всю ширину моста, после чего в течение 5 дней шел дождь. Сроки ввода моста в эксплуатацию не позволили высушить слой асфальта АВ и бетона перед устройством покрытия из литого асфальтобетона (вот пример работы нашей системы – сдать в срок, хотя и с дефектами, но в срок, а переделывать будем потом. Существует даже формула, характерная для нашей действительности: никогда нет времени сделать все в срок, но всегда есть время для переделок). Эта же причина не позволила произвести укладку литого асфальтобетона не на всю ширину моста с целью обеспечения свободного выхода влаги из мокрого бетона и нижнего слоя асфальтобетона. Таким образом, между слоем гидроизоляции и слоем литого асфальтобетона оказалось большое количество воды. В результате в летнее время, когда температура воздуха поднимается до 30 – 40 градусов, эта вода начинает испаряться и давить на влагонепроницаемый слой литого асфальтобетона; поскольку не произошло необходимого сцепления слоя литого асфальтобетона с влажным нижним слоем, это привело к образованию так называемых «пузырей». По этой причине в течение двух лет пришлось ремонтировать покрытие из литого асфальтобетона, причем общая площадь ремонтных работ достигала 200 квадратных метров. При вскрытии ремонтируемых участков покрытия в нижнем слое асфальтобетона и защитном слое бетона были обнаружены разрывы, из которых выходила вода.

Как видно, при устройстве гидроизоляции и дорожной одежды на мостах необходимо соблюдать технологию их укладки. Выполнение работ в дождливую погоду, не просушивание места работы после замачивания приводит к появлению подушек, вздутий и вызывает необходимость выполнения ремонтных работ.

Еще одной возможной причиной появления вздутий на дорожной одежде, устраиваемой по железобетонной плите проезжей части, может быть укладка гидроизоляции и асфальтобетона на не высушенную или не выдержанную поверхность бетона. Например, в Германии при наличии возможности стараются выдерживать бетонную поверхность до полугода. Для уменьшения влияния этого фактора применяется укладка специальной сетки «Хателит».



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛАСТИНЫ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ. СООБЩЕНИЕ 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ.

Армированная прямоугольная пластина является расчетной схемой для многих плоских конструктивных элементов, находящихся широкое применение в промышленном, гражданском и транспортном строительстве.

В нормативных документах различных стран пока еще отсутствуют достаточно надежные правила определения срока службы эксплуатируемых конструкций. Поэтому необходимо разрабатывать модели и методы для прогнозирования напряженно-деформированного состояния и количественного определения срока службы армированных конструкций. При этом в дополнение к предельным состояниям конструкций при действии нагрузок добавляются предельные состояния по долговечности при действии агрессивных эксплуатационных сред.

Ниже рассматривается подход к моделированию кинетики изменения напряженно - деформированного состояния прямоугольной железобетонной пластины, подвергающейся совместному действию нагрузки и хлоридсодержащей среды.

При построении модели пластины в условиях воздействия хлоридсодержащей среды применяется феноменологический подход, основывающийся на рассмотрении армированного материала как неоднородной среды с использованием методологии строительной механики. Согласно этому подходу, обобщенная модель деформирования пластины с учетом ее взаимодействия с агрессивной средой, представляется в виде совокупности моделей: 1) модели конструктивного элемента; 2) модели нагружения; 3) модели деформирования материалов пластины; 4) модели воздействия агрессивной хлоридсодержащей среды; 5) модели разрушения материала, трактуемого как процесс накопления повреждений.

Модель конструктивного элемента. В качестве модели конструктивного элемента рассматривается модель пластины по технической теории изгиба с учетом соответствующих гипотез.

Уравнения, описывающие равновесие пластины в усилиях имеют вид:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p. \quad (1)$$

Здесь M_x, M_y – изгибающие моменты, H – крутящий момент, p – интенсивность внешней нагрузки.

Модель нагружения. Схема и программа нагружения пластины будет зависеть от того, моделью какого конструктивного элемента является рассматриваемая пластина.

Модель деформирования материала пластины, находящейся в плоском напряженном состоянии и подвергающейся воздействию хлоридсодержащей среды. При выводе физических соотношений будем учитывать, что наличие армирующих элементов и характерные свойства бетона придают материалу пластины анизотропные свойства. Армированный бетон является ортотропным материалом, неодинаково сопротивляющимся растяжению и сжатию, причем бетон и арматура имеют близкие коэффициенты расширения, но бетон имеет отличающиеся диаграммы деформирования при растяжении и сжатии. Это позволяет использовать для описания поведения армированного бетона составную модель ортотропного нелинейного разномодульного материала. Основные соотношения, описывающие поведение элемента пластины в условиях плоского напряженного состояния, будут складываться из физических соотношений для бетона, работающего в условиях плоского напряженного состояния, и физических соотношений для арматуры, которая работает в условиях одноосного напряженного состояния для каждого направления армирования. Влияние эффекта времени на процесс деформирования учитывается путем введения параметра поврежденности в физические соотношения и конструированием специальных уравнений накопления повреждения для этого параметра.

1) Физические соотношения для бетона принимаются в виде [1]:

$$\sigma_x^b = \frac{\Psi_j}{1-\nu_j^2} (e_x + \nu_j e_y); \quad \sigma_y^b = \frac{\Psi_j}{1-\nu_j^2} (e_y + \nu_j e_x); \quad \tau_{xy}^b = \frac{\Psi_j}{2(1+\nu_j)} e_{xy}. \quad (2)$$

где ν_j – коэффициент поперечной деформации, $j = 1, 2$; $\sigma_x^b, \sigma_y^b, \tau_{xy}^b$ – компоненты тензора напряжений,

e_x, e_y, e_{xy} – то же, деформаций, причем:



$$\begin{aligned}
e_x &= \varepsilon_x + \chi_x z; & e_y &= \varepsilon_y + \chi_y z; & e_{xy} &= \varepsilon_{xy} + 2\chi_{xy} z; \\
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}; \\
\chi_x &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; & \chi_y &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; & \chi_{xy} &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.
\end{aligned} \tag{3}$$

В этих формулах $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ – деформации точек срединной поверхности; $\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ – кривизны в этих точках, z – координаты рассматриваемых точек, отсчитываемые от срединной плоскости, u, v, w – перемещения в направлении осей x, y, z .

Принимается, что любая точка пластины находится в растянутом состоянии ($j=1$), если $\sigma_0 \geq 0$, и в сжатом состоянии ($j=2$), если $\sigma_0 < 0$. Здесь σ_0 – среднее напряжение, определяемое выражением:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}. \tag{4}$$

Функция Ψ_j имеет вид:

$$\Psi_j = \frac{\Phi_j(e_u, C, \Pi)}{e_u}, \quad j = 1, 2, \tag{5}$$

где Φ_j – функции, аппроксимирующие обобщенную кривую деформирования бетона $\sigma_u^b(e_u)$ при растяжении ($j=1$) и при сжатии ($j=2$); σ_u^b – интенсивность напряжений; e_u – интенсивность деформаций. Влияние концентрации хлоридсодержащей среды C и уровня поврежденности Π учитывается при задании выражений для Φ_j .

2) Физические соотношения для арматуры имеют в вид:

$$\text{а) для направления } x: \quad \sigma_x = f_x(e_x); \tag{6}$$

$$\text{б) для направления } y: \quad \sigma_y = f_y(e_y). \tag{7}$$

Здесь f_x – функция, аппроксимирующая диаграмму деформирования стержневой арматуры, уложенной в направлении x , а f_y – в направлении y .

Модель воздействия агрессивной хлоридсодержащей среды. Процесс взаимодействия хлоридсодержащей среды с армированной пластиной состоит из нескольких стадий: проникание среды в объем пластины; взаимодействие её с материалом, приводящее к изменению механических характеристик бетона и коррозии арматуры; деформирование и разрушение с учетом происходящего процесса деградации. На стадии проникания среды формируется закон распределения агрессивной среды по объему пластины, определяющий затем характер неоднородности бетона и интенсивность коррозии арматуры.

Модель проникания хлоридсодержащей среды. Кинетика проникания хлоридсодержащей среды в пластину описывается с помощью уравнения диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad} C) - g(C), \tag{8}$$

где t – время; D – коэффициент диффузии; $g(C)$ – скорость связывания проникшей среды.

Для нахождения распределения концентрации хлоридсодержащей среды C по объему пластины в любой момент времени нужно решить это уравнение с начальными и граничными условиями, соответствующими рассматриваемой задаче.

Модель воздействия хлоридсодержащей среды на бетон. Полагая, что бетон является нелинейным разнсопротивляющимся материалом, зависимость $\sigma_u^a(e_u, C)$ запишем в виде:

$$\sigma_u^b = [A_j^b(C) \cdot e_u - B_j^b(C) \cdot e_u^{m_j(C)}] / (1 + \lambda \Pi), \tag{9}$$

где $A_j^b(C), B_j^b(C), m_j(C)$ – функции, учитывающие влияние концентрации хлоридсодержащей среды C на деформирование бетона при растяжении ($j = 1$) и сжатии ($j = 2$), а функция $(1 + \lambda \Pi)$ учитывает влияние уровня поврежденности Π на деформирование бетона. Включение функции поврежденности Π в физические соотношения для бетона (9) позволяет отразить влияние ползучести бетона на процесс его деформирования через изменение диаграммы деформирования с течением времени под влиянием поврежденности.



Модель воздействия хлоридсодержащей среды на арматуру. Так как под влиянием хлоридсодержащей среды изменения механических свойств арматуры практически не происходит, а происходит коррозионное разрушение, вызывающее изменение площади сечения арматуры, то зависимость между напряжениями и деформациями в арматуре примем в виде диаграммы Прандтля:

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot e, & \sigma < \sigma_T, \\ \sigma_T, & \sigma \geq \sigma_T \end{cases} \quad (10)$$

где E – модуль упругости; σ_T – предел текучести.

Процесс коррозионного разрушения арматуры состоит из двух стадий: инкубационного периода t_u , в течение которого концентрация хлоридов в точке расположения арматурного стержня изменяется от начального до критического значения C_{KP} и стадии интенсивного коррозионного разрушения, в течение которой происходит коррозионный (чаще всего локальный) износ арматуры.

Кинетику коррозионного износа арматуры можно описывать с различных моделей. Полагаем, что коррозионный износ описывается функцией:

$$\delta = \begin{cases} 0, & t < t_u, \\ (\delta_K \cdot t)/(t + T), & t \geq t_u \end{cases} \quad (11)$$

где δ_K – предельная глубина коррозии; T – параметр.

Полагая, что коррозионный износ арматурного стержня круглого сечения с начальным диаметром d_0 происходит по хорде, площадь его сечения с учетом коррозионного поражения запишем в виде:

$$F(t) = \begin{cases} (\pi \cdot d_0^2)/4, & t < t_u, \\ (\pi \cdot d_0^2)/4 - d_0^2 \cdot (S - \sin S)/8, & t \geq t_u, \end{cases} \quad (12)$$

где $S = 2 \arccos(1 - (2 \cdot \delta / d_0))$.

Модель разрушения материала. В подавляющем большинстве случаев разрушения армированных конструкций начинается с разрушения матрицы, то есть в случае железобетона – с разрушения бетонной части конструкций. Поэтому при моделировании разрушения армированной пластины будем рассматривать процесс разрушения бетона. Причем процесс разрушения бетона будем рассматривать как процесс накопления дисперсных повреждений, распределенных по объему конструктивного элемента. Уровень поврежденности оцениваем с помощью параметра поврежденности Π , равного нулю в начальном неповрежденном состоянии материала и равного единице в момент разрушения. Скорость изменения параметра Π полагаем зависящей от интенсивности напряжений σ_u^b , вида напряженного состояния, концентрации хлоридсодержащей среды C и достигнутого значения поврежденности Π . В результате уравнение накопления повреждений принимаем в виде:

$$d\Pi/dt = a_j(C) [\sigma_u^b / (1 - \Pi)]^{e_j(C)}, \quad \Pi(0) = 0, \Pi(t_p) = 1, \quad j = 1, 2, \quad (13)$$

где t_p – время до разрушения точки пластины, в которой поврежденность достигает предельного уровня $\Pi = 1$, $a_j(C)$ и $e_j(C)$ – коэффициенты уравнения накопления повреждений, зависящие от концентрации агрессивной среды C в точке пластины и от вида напряженного состояния в этой точке.

Здесь также принимается, что точка пластины находится в растянутом состоянии ($j=1$), если $\sigma_0 \geq 0$, и в сжатом состоянии ($j=2$), если $\sigma_0 < 0$.

Если предположить, что локальное разрушение пластины (в точке) можно отождествить с разрушением всей пластины, то тогда t_p можно принять за время до разрушения пластины в агрессивной среде.

Физические соотношения для усилий и деформаций, возникающих в железобетонной пластине. Полагаем, что усилия в сечениях пластинки складываются из усилий, воспринимаемых бетоном, и усилий, воспринимаемых арматурой, а на сдвиг работает только бетон.

С учетом этого имеем:

$$\begin{aligned} M_x &= M_x^b + M_x^a; & M_y &= M_y^b + M_y^a; & H &= H^b; \\ N_x &= N_x^b + N_x^a; & N_y &= N_y^b + N_y^a; & S &= S^b. \end{aligned} \quad (14)$$

Выражения для частей моментов и усилий, воспринимаемых бетоном:



$$\begin{aligned}
M_x^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{xj}^b z dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{xi}^b z dz, \quad M_y^b = \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{yj}^b z dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{yi}^b z dz, \\
H^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \tau_{xyj}^b z dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \tau_{xyi}^b z dz, \quad N_x^b = \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{xj}^b dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{xi}^b dz, \\
N_y^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \sigma_{yj}^b dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \sigma_{yi}^b dz, \quad S^b = \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \tau_{xyj}^b dz + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \tau_{xyi}^b dz.
\end{aligned} \tag{15}$$

Здесь z_0 — уравнение нейтральной поверхности, определяемой из условия $\sigma_0=0$ и отделяющей растянутую зону пластинки от сжатой; i, j — индексы, характеризующие сжатую и растянутую зону пластинки. Если нижняя зона изгибаемой пластинки растянута, то $j=1, i=2$; если нижняя зона изгибаемой пластинки сжата, а верхняя растянута, то $j=2, i=1$.

Выражения для z_0 получаются из условия:

$$\sigma_0^b = \frac{(\sigma_x^b + \sigma_y^b)}{3} = \frac{\Psi_j}{1 - \nu_j^2} [(1 + \nu_j)(e_x + e_y)] = 0. \tag{16}$$

$$z_0(x, y) = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\chi_x + \chi_y}. \tag{17}$$

Для получения выражений для моментов и усилий, воспринимаемых арматурой, заменим арматурные стержни в направлении координаты x сплошным эквивалентным слоем металла переменной толщины. Переменность толщины эквивалентного слоя в направлении координаты x определяется законами изменения площади поперечного сечения арматурных стержней в направлении координаты x . Переменность толщины эквивалентного слоя в направлении координаты y определяется аппроксимацией площадей арматурных стержней в направлении y некоторой функцией, задающей закон изменения толщины эквивалентного слоя в направлении y .

Обозначим η_x, η_y — толщины эквивалентных армирующих слоев в верхней части пластинки, эквивалентных арматуре в направлениях, соответственно x, y ; λ_x, λ_y — толщины эквивалентных армирующих слоев в нижней части пластинки, эквивалентных арматуре в направлениях, соответственно x, y ; z_{η_x}, z_{η_y} — ординаты центров тяжести эквивалентных армирующих слоев в верхней части пластинки; $z_{\lambda_x}, z_{\lambda_y}$ — ординаты центров тяжести эквивалентных армирующих слоев в нижней части пластинки.

Далее будем полагать, что под влиянием коррозионного износа будет изменяться сечение арматурных стержней, приводя к изменению толщин $\eta_x, \eta_y, \lambda_x, \lambda_y$ эквивалентных армирующих слоев, не изменяя величины координат центров тяжести $z_{\eta_x}, z_{\eta_y}, z_{\lambda_x}, z_{\lambda_y}$. Таким образом, будем полагать, что под влиянием коррозионного износа толщина эквивалентных армирующих слоев изменяется, а их положение по толщине пластинки остается неизменным.

С учетом введенных гипотез выражения для части моментов и усилий, воспринимаемых арматурой, примут вид [1]:

$$\begin{aligned}
M_x^a &= \sigma_x^a(z_{\lambda_x}) \lambda_x z_{\lambda_x} + \sigma_x^a(z_{\eta_x}) \eta_x z_{\eta_x}, \\
M_y^a &= \sigma_y^a(z_{\lambda_y}) \lambda_y z_{\lambda_y} + \sigma_y^a(z_{\eta_y}) \eta_y z_{\eta_y}, \\
N_x^a &= \sigma_x^a(z_{\lambda_x}) \lambda_x + \sigma_x^a(z_{\eta_x}) \eta_x, \\
N_y^a &= \sigma_y^a(z_{\lambda_y}) \lambda_y + \sigma_y^a(z_{\eta_y}) \eta_y.
\end{aligned} \tag{18}$$



Здесь $\sigma_x^a(z_{\lambda_x})$ – напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси x и расположенном в нижней части пластины на расстоянии z_{λ_x} от срединной поверхности; $\sigma_x^a(z_{\eta_x})$ – напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси x и расположенном в верхней части пластины на расстоянии z_{η_x} от срединной поверхности; $\sigma_y^a(z_{\lambda_y})$ – напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси y и расположенном в нижней части пластины на расстоянии z_{λ_y} от срединной поверхности; $\sigma_y^a(z_{\eta_y})$ – напряжение в эквивалентном армирующем слое, работающем в направлении оси y и расположенном в верхней части пластины на расстоянии z_{η_y} от срединной поверхности. С учетом условия отсутствия продольных усилий в сечении пластины, получим следующие окончательные выражения для M_x , M_y и H :

$$\begin{aligned} M_x &= D_{11}\chi_x + D_{12}\chi_y, \\ M_y &= D_{21}\chi_x + D_{22}\chi_y, \\ H &= D_3\chi_{xy}, \end{aligned} \quad (19)$$

где:

$$\begin{aligned} D_{11} &= \left[f_{11}(J_1^b + J_{x1}^a) + (J_2^b + J_{x2}^a) + f_{21}I_1^b \right], & D_{12} &= \left[f_{12}(J_1^b + J_{x1}^a) + f_{22}I_1^b + I_2^b \right], \\ D_{21} &= \left[f_{21}(J_1^b + J_{y1}^a) + f_{11}I_1^b + I_2^b \right], & D_{22} &= \left[f_{22}(J_1^b + J_{y1}^a) + (J_2^b + J_{y2}^a) + f_{12}I_1^b \right], \\ D_3 &= \left[2T_2^b - 2\frac{(T_1^b)^2}{T_0^b} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

в этих выражениях:

$$\begin{aligned} f_{11} &= \frac{I_0^b I_1^b - (J_0^b + J_{y0}^a)(J_1^b + J_{x1}^a)}{(J_0^b + J_{x0}^a)(J_0^b + J_{y0}^a) - (I_0^b)^2}, & f_{12} &= \frac{I_0^b (J_1^b + J_{y1}^a) - (J_0^b + J_{y0}^a)I_1^b}{(J_0^b + J_{x0}^a)(J_0^b + J_{y0}^a) - (I_0^b)^2}, \\ f_{22} &= \frac{I_0^b I_1^b - (J_0^b + J_{x0}^a)(J_1^b + J_{y1}^a)}{(J_0^b + J_{x0}^a)(J_0^b + J_{y0}^a) - (I_0^b)^2}, & f_{21} &= \frac{I_0^b (J_1^b + J_{x1}^a) - (J_0^b + J_{x0}^a)I_1^b}{(J_0^b + J_{x0}^a)(J_0^b + J_{y0}^a) - (I_0^b)^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

Жесткости, входящие в эти выражения, определяются формулами:

для бетона:

$$\begin{aligned} J_k^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \alpha_j z^k \partial z + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \alpha_i z^k \partial z, \quad \kappa = 0, 1, 2. & I_k^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \alpha_j \nu_j z^k \partial z + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \alpha_i \nu_i z^k \partial z, \quad \kappa = 0, 1, 2. \\ T_k^b &= \int_{-\frac{h}{2}}^{z_0} \beta_j z^k \partial z + \int_{z_0}^{\frac{h}{2}} \beta_i z^k \partial z, \quad \kappa = 0, 1, 2; \end{aligned} \quad (22)$$

для арматуры:

$$J_{xk}^a = E_a (\lambda_x z_{\lambda_x}^k + \eta_x z_{\eta_x}^k), \quad J_{yk}^a = E_a (\lambda_y z_{\lambda_y}^k + \eta_y z_{\eta_y}^k) \quad \kappa = 0, 1, 2. \quad (23)$$

В формулах:

$$z_0 = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\chi_x + \chi_y} = -\frac{\chi_x (f_{11} + f_{21}) + \chi_y (f_{12} + f_{22})}{\chi_x + \chi_y} \quad (3.24)$$



$$\alpha_j = \frac{\Psi_j}{1 - \nu_j^2}, \quad \alpha_i = \frac{\Psi_i}{1 - \nu_i^2}, \quad \beta_j = \frac{\Psi_j}{2(1 + \nu_j)}, \quad \beta_i = \frac{\Psi_i}{2(1 + \nu_i)} \quad (25)$$

Следует учитывать, что при выводе вышеприведенных выражений предполагается, что арматура и бетон работают совместно, невзирая на коррозионный износ арматуры.

Разрешающее уравнение изгибаемой армированной пластины. Подставляя (19) в (1) и учитывая (3), получим следующее разрешающее дифференциальное уравнение изгиба армированной пластины в условиях хлоридной коррозии:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D_3 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \right) - 2m \nabla^2 W + nW = p(x, y). \quad (25)$$

Для определения характеристик напряженно-деформированного состояния армированной пластины в каждый момент времени необходимо из решения уравнения диффузии (8) с соответствующими начальными и граничными условиями найти закон распределения концентрации C хлоридсодержащей среды по объему пластины в рассматриваемый момент времени, по уравнениям (13) определить уровень накопления повреждений в точках объема пластины к рассматриваемому моменту времени, по уравнениям (11), (12) определить степень коррозионного поражения арматуры пластины к этому моменту времени, и решить уравнение (25) с соответствующими граничными условиями, позволяющими получить для каждого конкретного случая однозначное решение. Имея решение этого уравнения, можно определить напряжения и деформации в любой точке армированной пластины в рассматриваемый момент времени. Полученное дифференциальное уравнение изгиба армированной пластины в сочетании с уравнениями проникания хлоридсодержащей среды, уравнениями накопления повреждений в бетоне и уравнениями коррозионного износа арматуры позволяет рассчитывать долговечность пластины при разном характере нагружения, при разных схемах опирания пластины по контуру (шарнирное, жесткое, их сочетания), разных программах воздействия агрессивной хлоридсодержащей среды (среда сверху, снизу, среда с обеих сторон и среда действует на часть поверхности) и определять время до разрушения пластины.

Литература:

1. Овчинников И.И., Наумова Г.А. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами. Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолГАСУ. 2007. 272 с.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛАСТИНЫ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ. СООБЩЕНИЕ 2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

При расчете напряженно-деформированного состояния и долговечности железобетонной пластины следует учитывать задаваемые программу нагружения и схему воздействия хлоридсодержащей среды.

Рассмотрим методику расчета напряженно-деформированного состояния и поврежденности железобетонной пластины для следующего случая:

1) сначала к пластине прикладывается определенная нагрузка, создающая в ней соответствующее напряженно-деформированное состояние;

2) если эта нагрузка выдерживается в течение некоторого времени от $t = 0$ до $t = t_0$, то в бетоне происходит накопление повреждений в соответствии с уравнениями

$$d\Pi/dt = a_j(C) [\sigma_u^b / (1 - \Pi)]^{e_j(C)}, \quad \Pi(0) = 0, \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

где $a_j(C)$ и $e_j(C)$ – коэффициенты, принимаемые для бетона, не поврежденного воздействием хлоридсодержащей среды;

2) на поверхность пластины в момент ($t = t_0$) начинает действовать хлоридсодержащая среда, проникающая в материал пластины в соответствии с уравнением диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad} C) - g(C), \quad (2)$$

и вызывающая изменение механических характеристик бетона (изменение его диаграммы деформирования), продолжающееся накопление повреждений в бетоне в соответствии с кинетическими уравнениями (1), коэффициенты которых уже учитывают влияние хлоридсодержащей среды, коррозию арматуры по уравнению

$$\delta = \begin{cases} 0, & t < t_u, \\ (\delta_K \cdot t) / (t + T), & t \geq t_u \end{cases}, \quad (3)$$

и, как следствие, изменение напряженно-деформированного состояния;

3) при наступлении предельного состояния какого-либо вида: либо вследствие достижения предельного уровня поврежденности ($\Pi = 1$) в любой точке бетонного массива, либо вследствие достижения предельного уровня напряжений в арматуре, считается, что пластина выходит из строя.

Рассмотрим характерные стадии процесса взаимодействия армированной пластины с хлоридсодержащей средой, которые представим в виде следующей схемы:

Стадия 0: К пластине прикладывается внешняя нагрузка, хлоридсодержащая среда отсутствует. В пластине возникает исходное напряженно-деформированное состояние.



Стадия 1: Под влиянием напряженного состояния происходит накопление повреждений в точках материала пластины, приводящее к изменению характера обобщенной кривой деформирования и соответствующему изменению напряженно-деформированного состояния пластины вследствие влияния повреждений на процесс деформирования. К концу этой стадии ($t = t_0$) в пластине устанавливается определенное напряженно-деформированное и поврежденное состояние.



Стадия 2: Устанавливаются граничные условия модели воздействия хлоридсодержащей среды; в нашем случае принимается, что концентрация хлоридов для поверхности пластины увеличивается от 0 до C_0 за определенный промежуток времени t_{cp} .



Стадия 3: Происходит проникание хлоридсодержащей среды в бетон и деградация бетона защитного слоя. При этом в пластине изменяется напряженно-деформированное и поврежденное состояние вследствие совместного действия нагрузки, агрессивной среды и происходящего процесса накопления повреждений. Стадия продолжается до момента, когда концентрация хлоридов в месте расположения арматурного стержня, наиболее близкого к поверхности пластины, достигает критического уровня $C_{кр}$.

Стадия 4: На этой стадии продолжается процесс деградации бетона, изменение его механических характеристик, накопление повреждений в нем, а также начинается и происходит коррозионный износ арматурных стержней, в месте расположения которых концентрация хлоридсодержащей среды превышает критическое значение $C_{кр}$. В результате этого изменение напряженно-деформированного состояния происходит вследствие деградации бетона, коррозии арматуры и накопления повреждений в бетоне.

Стадия 5: Наступление предельного состояния какого-либо вида: достижение предельного уровня поврежденности ($\Pi = 1$) в любой точке бетонного сечения; достижение предельного уровня напряжений в арматуре.

Для решения дифференциального уравнения 4-го порядка в частных производных применяется метод конечных разностей, так как этот метод достаточно прост в применении, легко алгоритмизируется и хорошо зарекомендовал себя при расчете пластинок переменной толщины, уравнение изгиба которых внешне сходно с уравнением (4).

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D_3 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \right) - 2m \nabla^2 W + nW = p(x, y). \quad (4)$$

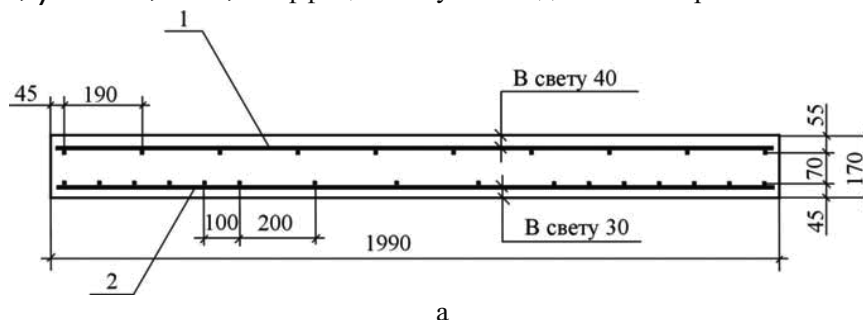
Проанализируем изменение напряженного состояния и поврежденности пластины с учетом воздействия хлоридсодержащей среды.

Исходные данные для расчета пластины. Геометрические размеры рассчитываемой железобетонной плиты (рис. 1) следующие: толщина $h = 0,17$ м; длина $a = 1,99$ м; ширина $b = 1,49$ м; толщина защитного слоя h_{zn} (поверху = 0,03 м, понизу = 0,04 м); диаметр арматурных стержней $d = 0,010$ м; количество арматурных стержней: в верхнем поясе: по $x = 11$ шт. через 0,14 м; по $y = 11$ шт. через 0,19 м; в нижнем поясе: по $x = 15$ шт. через 0,1 м; по $y = 16$ шт. через 0,125 м.

В расчетах использовалась зависимость:

$$\sigma = (A_j \cdot \varepsilon_u - B_j \cdot \varepsilon_u^3) \left(1 - k C^\beta \left(\frac{1}{1 + \lambda \Pi} \right) \right),$$

в которой: при растяжении: $A_1 = 30,8 \cdot 10^3$ МПа, $B_1 = 130 \cdot 10^9$ МПа; при сжатии: $A_2 = 45,2 \cdot 10^3$ МПа, $B_2 = 4,32 \cdot 10^9$ МПа; $k = 0,11$; $\beta = 0,447$; $\lambda = 1$; коэффициент Пуассона для бетона при



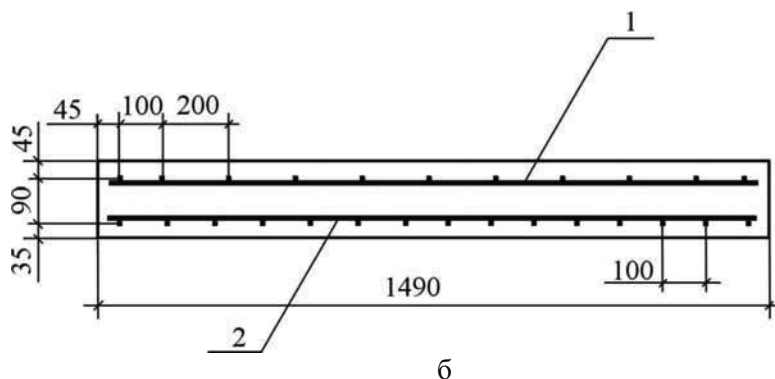


Рис. 1. Армирование плиты ПД 20.15.-6:
а – в продольном направлении ;б– в поперечном направлении;
1– верхний пояс из арматуры класса АШФ-8;
2– нижний пояс из арматуры класса АШФ-8

растяжении и сжатии принят равным 0,2; модуль упругости арматуры $E_a = 180000$ МПа, интенсивность равномерно распределенной нагрузки $p = 0 - 0,35$ МПа, параметры уравнения коррозионного износа арматуры: $\delta_0 = 3,06 \cdot 10^{-3}$ м, $T = 2414$ сут. Шаг сетки $16 \times 12 \times 72$ (рассматривалась четвертая часть пластинки; для полной пластинки сетка имеет вид: $32 \times 24 \times 72$)

С использованием специально разработанного программного комплекса был произведен расчет напряженно-деформированного состояния и поврежденности железобетонной пластинки при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды.

Анализ напряженно-деформированного и поврежденного состояния пластинки, жестко заземленной по контуру при действии агрессивной среды на верхнюю поверхность пластинки

На рис. 2 - 18 приведены результаты расчета пластинки при интенсивности нагрузки 0.2 МПа.

На рис. 2, 3 приведены эпюры прогибов по главным сечениям пластинки в моменты времени $t=1500$ (штриховая линия), $t=5000$ суток (пунктирная линия) и $t=11270$ суток (сплошная линия). На рис. 4, 5 показаны эпюры соответствующих кривизн. Характер распределения поверхности z_0 , отделяющей сжатую зону пластинки от растянутой приведены на рис. 6,7. На рис. 8 приведены эпюры $e_i/e_{\max}$ по толщине пластинки в середине ее длинной стороны, а на рис. 9 – в этом же сечении эпюры секущего модуля ψ для соответствующих моментов времени. Изменения характера эпюр напряжений в этой же точке с течением времени иллюстрируются рис. 11. На рис. 10 показаны эпюры поврежденности по толщине в центральной точке пластинки в указанные моменты времени, а на рис. 12 – эпюры поврежденности по толщине в середине длинной стороны пластинки для этих же моментов времени. Рис. 13 иллюстрирует кинетику изменения эпюр концентрации хлоридсодержащей среды по толщине в средней точке пластинки. Кинетика изменения максимального прогиба пластинки вследствие влияния и поврежденности и хлоридсодержащей среды на процесс деформирования пластинки иллюстрируется рис. 14. На рис. 15, 16 показана кинетика накопления повреждений в трех точках на верхней (рис. 15) и нижней (рис. 16) поверхностях пластины. Рис. 17 иллюстрирует кинетику уменьшения диаметра арматуры вследствие коррозионного износа. На рис. 18 приведена кривая долговечности пластинки при действии равномерной нагрузки и хлоридсодержащей среды на верхнюю поверхность пластинки. Анализ этой кривой показывает, что на ней наблюдаются два характерных участка, разрушение на первом наступает из-за того, что деформации в наиболее напряженной точке достигают предельного уровня, соответствующего максимуму диаграммы деформирования материала, а на втором участке долговечность определяется достижением параметром поврежденности Π предельного значения в нижней точке середины длинной стороны пластинки.

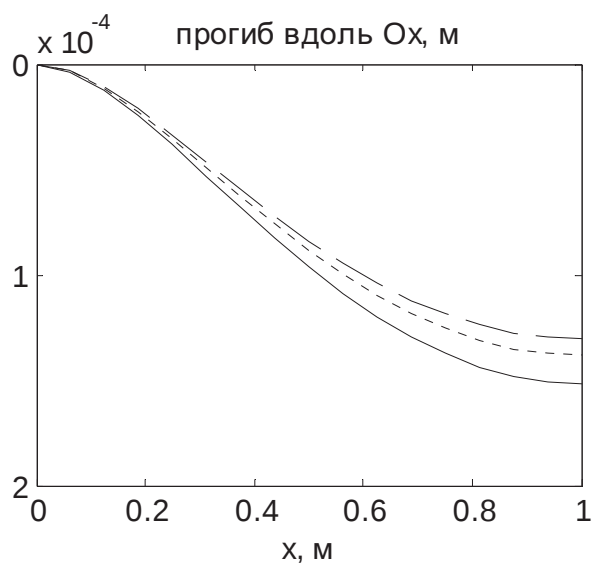


Рис. 2

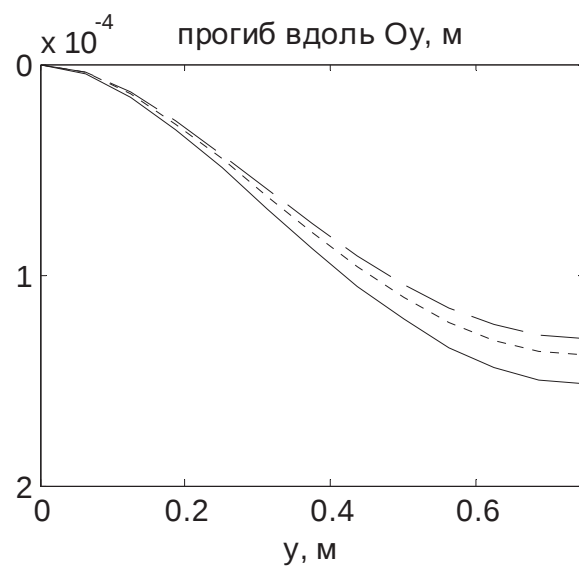


Рис. 3

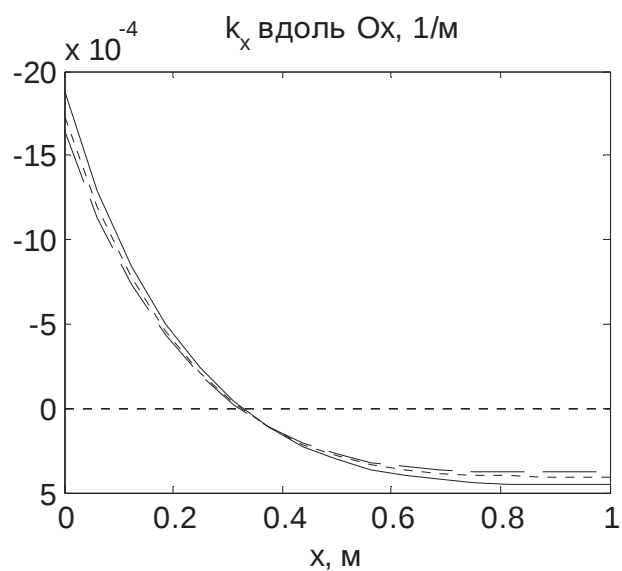


Рис. 4

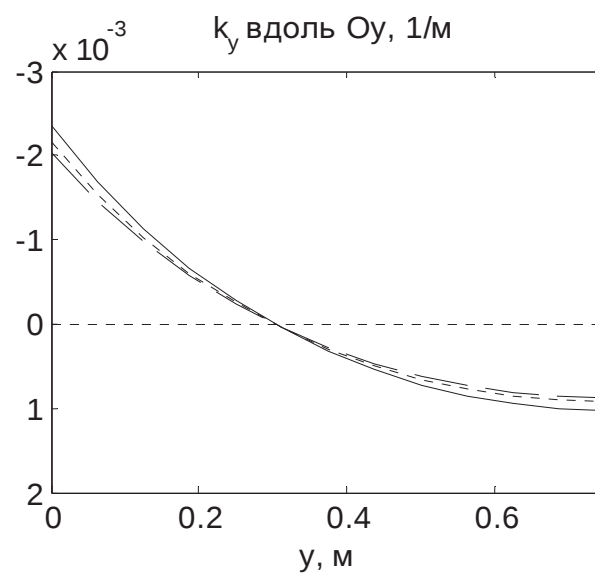


Рис. 5

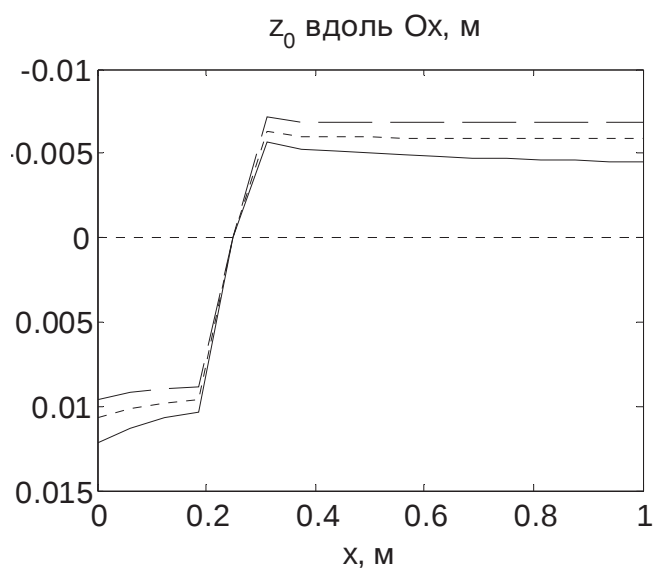


Рис. 6

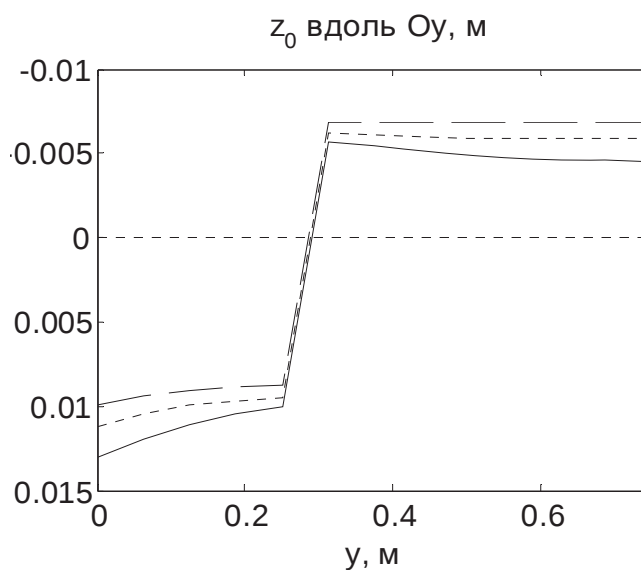


Рис. 7



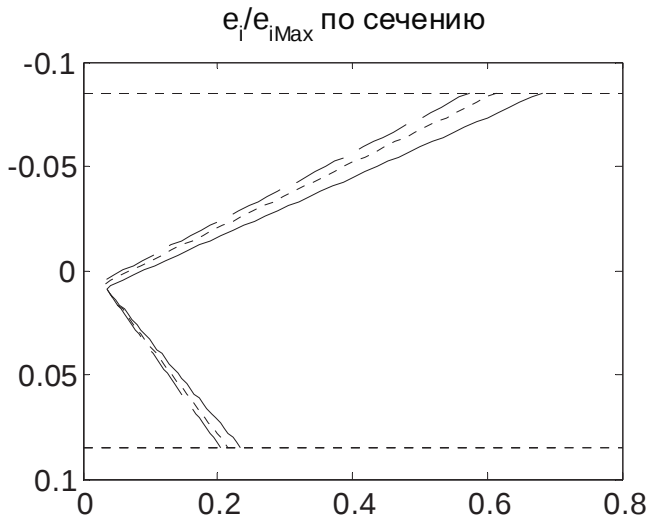


Рис. 8

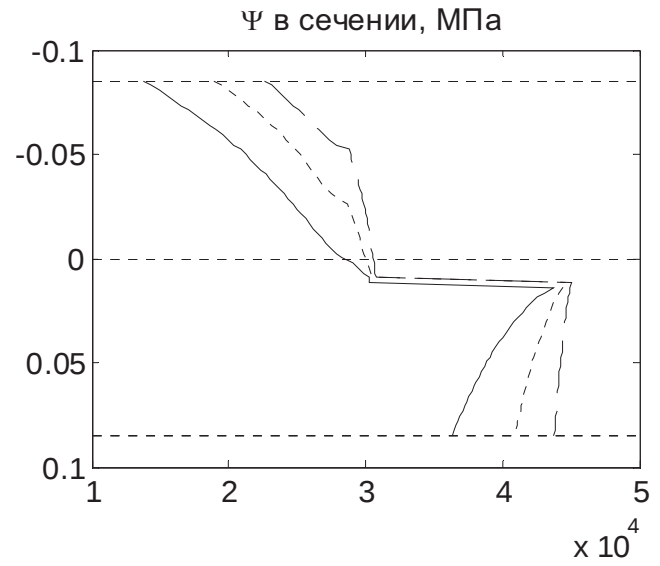


Рис. 9

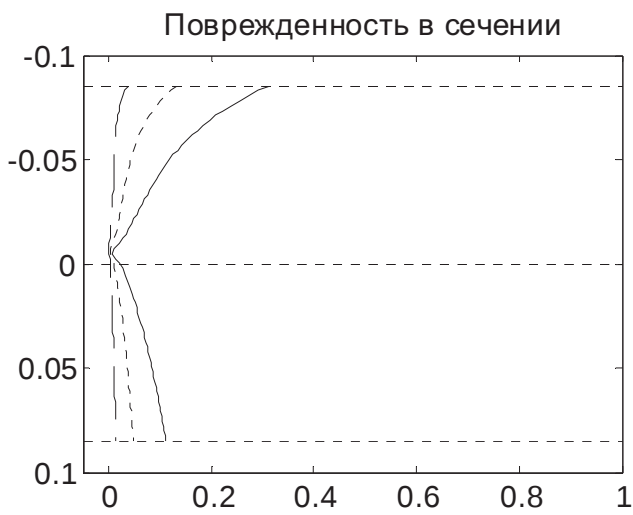


Рис. 10

Сечение – в середине пластинки

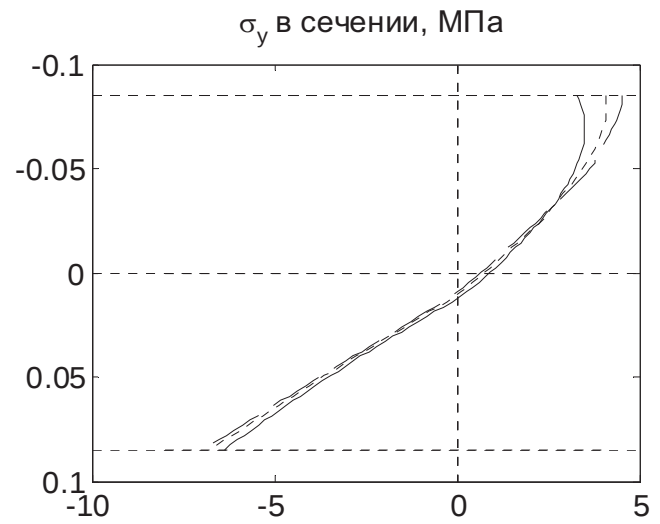


Рис.11

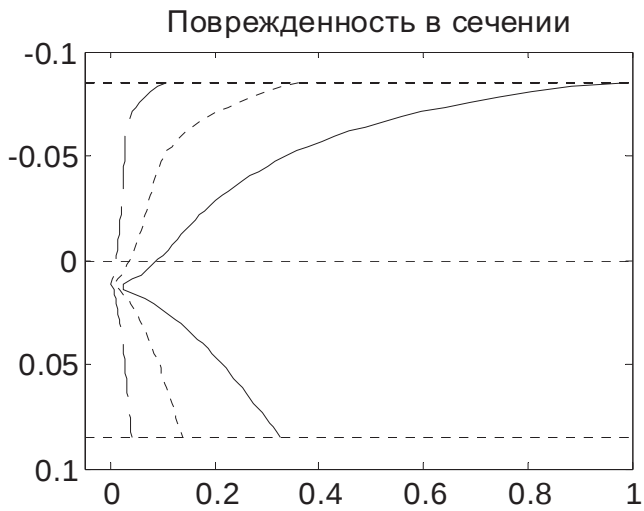


Рис. 12

Сечение – в середине длинной стороны

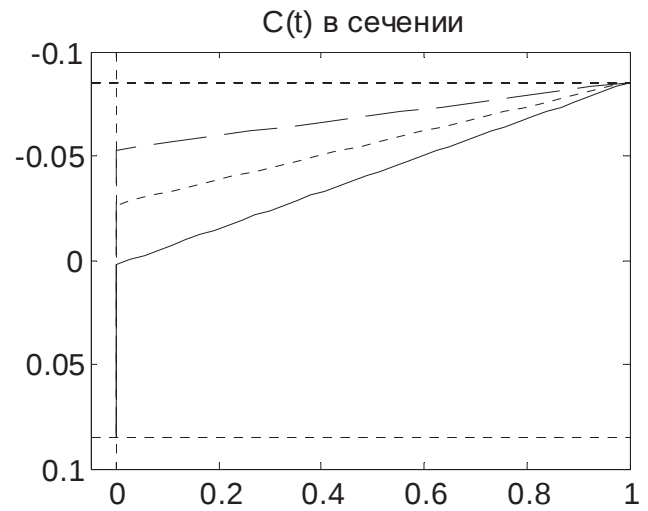


Рис. 13

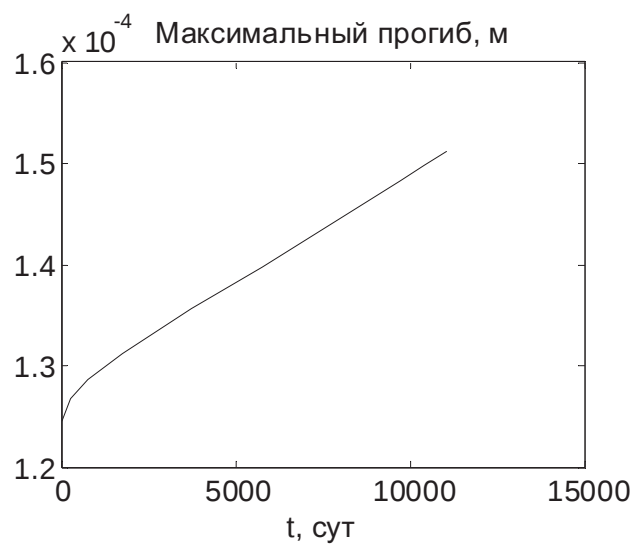


Рис. 14

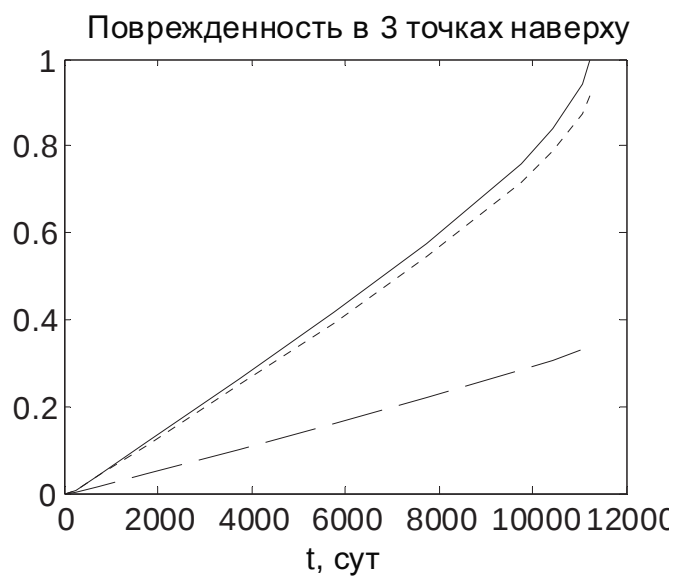


Рис. 15.

Центр (---), середина длинной стороны (—), середина короткой стороны (···)

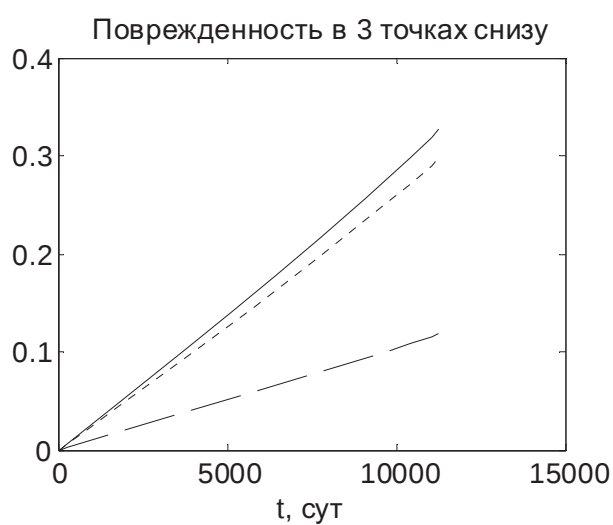


Рис. 16.

Центр (---), середина длинной стороны (—), середина короткой стороны (···)

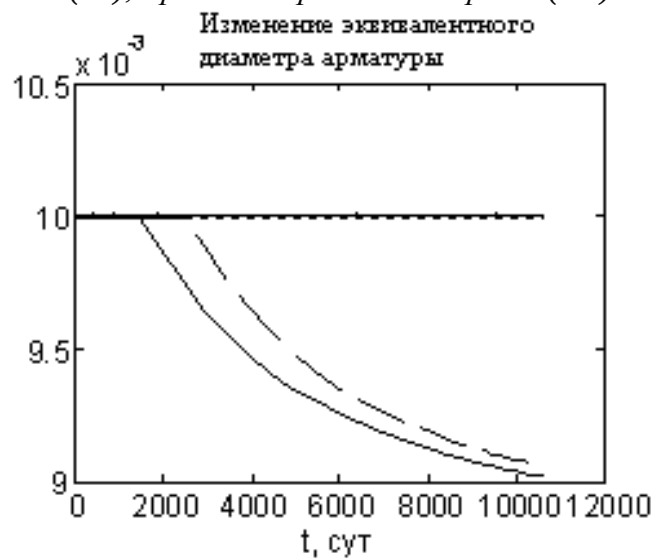


Рис. 17.

Слой сверху вниз: —, --, ···, ·-·

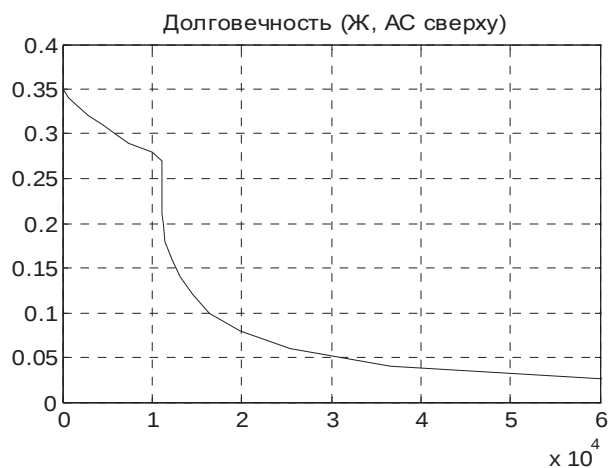


Рис. 18



РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВЕДЕНИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Водопропускные трубы являются искусственными сооружениями, встроенными в грунтовый массив насыпи, который обладает разными физико-механическими, гидрогеологическими характеристиками и свойствами. Всё это может отрицательно влиять на работу конструкций труб. Большую опасность для водопропускных труб под насыпями представляет вода, отводимая с проезжей части автомобильной дороги и зачастую содержащая в растворенном виде те или иные компоненты, применяемые для борьбы с гололедом, принесенные автомобилями с загрязненных промышленных территорий, содержащиеся в снеге и других осадках. Хлориды и сульфаты, которые содержатся в этой воде и снеге, ведут себя весьма агрессивно по отношению к бетону и арматуре железобетонных труб, и являются для них коррозионными реагентами. Снег, талая вода и вода, протекающая через отверстия водопропускных труб, также содержат различные агрессивные по отношению к материалу труб компоненты. В особенности это проявляется, когда на территории водосбора находятся промышленные предприятия, нефтехранилища, бензозаправочные станции, химические заводы. Эта вода может иметь различный химический состав с наличием сероводорода, углекислого газа, аммиака и других компонентов, которые вызывают коррозию и разрушение внутренних частей труб.

Помимо вышесказанных факторов воздействия, которые условно можно отнести к агрессивным воздействиям среды эксплуатации, необходимо упомянуть и о силовых воздействиях. Конструкция водопропускной трубы находится в постоянном взаимодействии с толщей грунта, окружающего тело трубы. Помимо этого, труба должна быть в состоянии нести и временную нагрузку от проходящих по телу насыпи транспортных средств.

Все данные о внешних воздействиях на водопропускные трубы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Внешние воздействия на водопропускные трубы

Группа и вид воздействия	Характер воздействия					
	во времени		по направлению		по разрушающему действию	
	постоянная нагрузка	временная нагрузка	из грунта	изнутри трубы	механическое разрушение	коррозионное разрушение
1 группа - постоянные и временные силовые воздействия:						
– вертикальное и горизонтальное давление грунта насыпи;	*	-	*	-	*	-
– собственный вес трубы;	*	-	*	-	*	-
– вес воды в трубе;	*	-	*	-	*	-
– отпор грунта;	*	-	*	-	*	-
– вертикальная и горизонтальная нагрузка от наземного транспорта;	-	*	*	-	*	-
– действие строительных факторов;	-	*	*	-	*	-
– сейсмическое воздействие;	-	*	*	-	*	-
– динамическое воздействие подвижного состава;	-	*	*	-	*	-
– температурное воздействие;	-	*	-	*	*	-
– образование наледей	-	*	-	*	*	-
2 группа - агрессивное воздействие окружающей среды:						
– воздействие грунтов и	*	-	*	-	-	*



грунтовых вод;	-	*	-	*	-	*
– воздействие поверхностных вод;	*	-	*	*	-	*
– газовая (физическая и химическая) коррозия;	*	-	-	*	-	*
– атмосферная коррозия;	*	-	-	*	-	*
– биологическая коррозия;	*	-	*	-	-	*
– электрокоррозия						

В течение времени эксплуатации результатом целой системы воздействий на конструкцию водопропускной трубы, в конце концов, становится возникновение и развитие различного рода повреждений в теле трубы, которые мешают или не позволяют водопропускной трубе нормально функционировать с выполнением всех заложенных при проектировании эксплуатационных показателей.

Повреждения и дефекты водопропускных труб можно классифицировать по принадлежности их к определенным элементам конструкции водопропускной трубы (звенья труб, оголовки, фундаменты и так далее), а также по виду повреждений (приводящие к изменению расчетной схемы, осадки фундаментов труб, трещины, сколы защитного слоя, раковины, размораживание, выщелачивание бетона, коррозионные повреждения арматуры и так далее). Дефекты и повреждения водопропускных труб, снижающие их эксплуатационные показатели, можно классифицировать, рассматривая конструкцию трубы с различных точек зрения: а) водопропускная труба как гидравлическое сооружение, обеспечивающее пропуск вод; б) водопропускная труба как транспортное сооружение, обеспечивающее проезд транспорта; в) водопропускная труба как силовая конструкция, воспринимающая нагрузки и передающая их на грунт.

С целью выявления наиболее загруженных и потенциально опасных (наиболее поврежденных) участков водопропускной трубы был проведен анализ условий работы водопропускных труб на действие нагрузок и агрессивных сред.

Дорожная грунтовая насыпь, внутрь которой уложена водопропускная труба, является сооружением переменной высоты, если смотреть вдоль трубы (рис.1). Переменная высота насыпи создает переменную вдоль трубы нагрузку, а периоды времени, за которые фронт агрессивной среды достигнет разных точек тела водопропускной конструкции, будут различными. Из-за этой особенности каждый участок трубы находится в своих эксплуатационных условиях, с различными повреждениями и различным напряженно-деформированным состоянием.

Протяженность водопропускной трубы внутри насыпи порой достигает нескольких десятков метров. Условно разобьем тело трубы на 3 участка: 1 – входной участок; 2 – средний участок; 3- выходной участок (рис.1). Рассмотрим действие внешних факторов на каждую часть трубы в отдельности и определим зоны трубы, наиболее подвергающиеся действию агрессивных сред и эксплуатационных нагрузок.

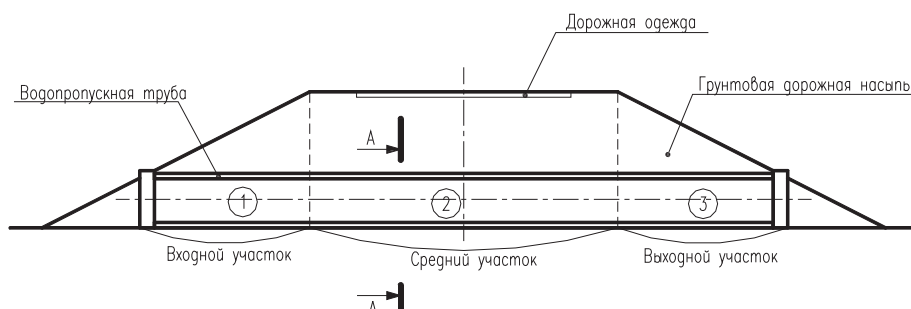


Рис.1. Схема водопропускной трубы

Вначале рассмотрим действие грунтовых нагрузок от земляного полотна дорожной насыпи на водопропускную трубу. Закон распределения давления насыпи на трубу вдоль ее оси характеризуется нагрузкой с переменной вдоль оси интенсивностью, как показано на рис. 2. Наиболее загруженным участком, как видно на рис. 2, является средняя часть тела водопропускной трубы.



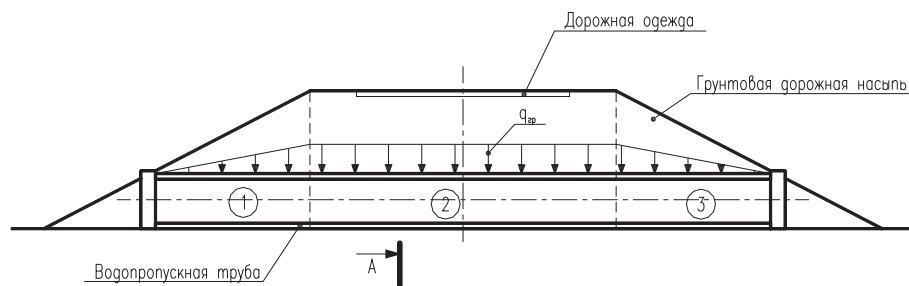


Рис.2. Эпюра грунтовой нагрузки

Помимо грунтовой нагрузки значительное влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонной водопропускной трубы оказывает временная нагрузка от транспорта, перемещающегося по проезжей части, уложенной на теле насыпи. Полагаем, что нагрузка от веса транспорта распределяется по поверхности водопропускной трубы так, как показано на рис. 3.

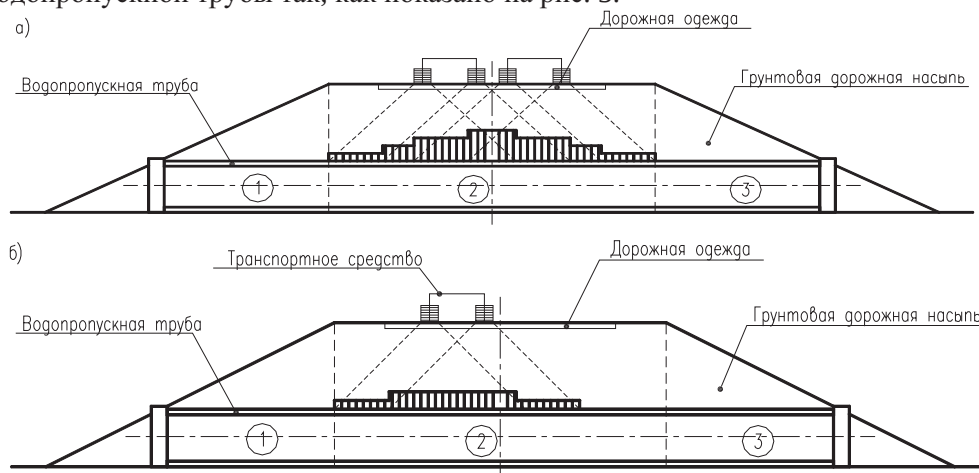


Рис.3. Временная нагрузка от подвижного состава:

а – загружено две полосы движения; б – загружена одна полоса движения.

Максимальное загрузке трубы достигается в момент прохождения транспорта над трубой по всем полосам движения с одновременным действием статической нагрузки от грунта насыпи. Суммарная эпюра такой нагрузки показана на рис.4.

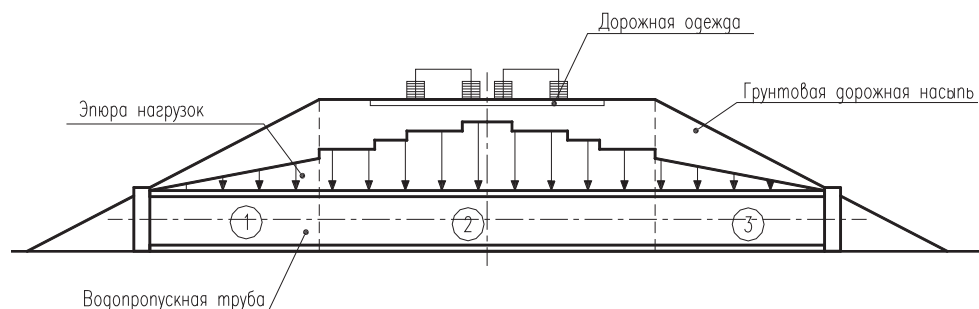


Рис.4. Общая схема загрузки водопропускной трубы грунтовой нагрузкой и нагрузкой от подвижного состава по всем полосам движения

Как видно из рисунка 4, наиболее загруженным участком водопропускной трубы является центральный участок (участок 2), поэтому на данном участке часто проявляются различные повреждения силового происхождения, такие как осадка звеньев и раскрытие деформационных швов между секциями (в случае, если рассматриваются сборные железобетонные трубы). Для нормального функционирования водопропускной трубы без нарушения эксплуатационных показателей у тела трубы в центральной части необходимо устраивать строительный подъем, который будет рассчитываться с учетом временной подвижной и статической грунтовой нагрузки.

Теперь рассмотрим водопропускную трубу, добавляя к силовым факторам агрессивные воздействия эксплуатационной среды.



Причины возникновения агрессивных сред, контактирующих с телом водопропускной трубы, как уже упоминалось выше, различны. Рассмотрим характерные случаи и определим наиболее вероятные зоны повреждения тела железобетонной водопропускной трубы от хлоридных реагентов.

Случай 1. Трасса находится в прибрежных районах, воздух которых насыщен хлоридами. Агрессивная среда через откосы насыпи с атмосферными осадками проникает вглубь земляного полотна. Дорожная одежда почти не пропускает атмосферную влагу, насыщенную хлоридами. Вся влага отводится с дорожной одежды в стороны на обочины и откосы, поэтому обочины получают наибольшее количество влаги. Этот случай, когда хлориды проникают через откосы, но не проходят через дорожную одежду, схематично показан на рис. 5. Зоны распространения агрессивного фронта показаны схематично.

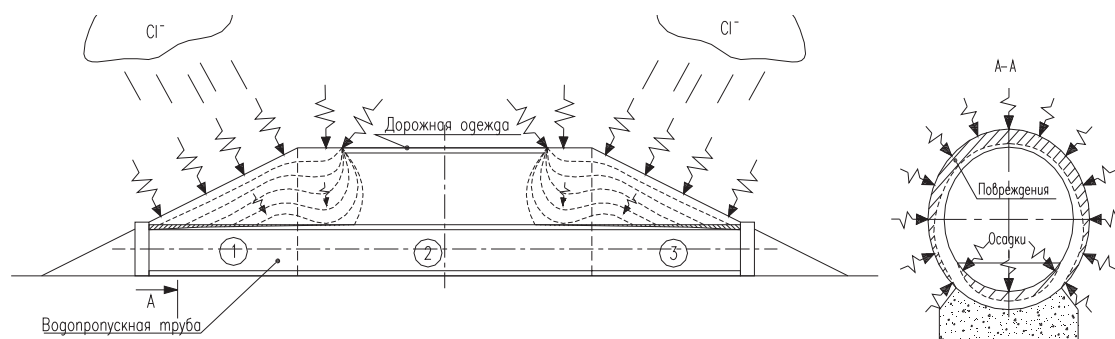


Рис.5. Схематичное изображение случая, когда хлориды проникают через откосы, но не проходят через дорожную одежду

Быстрее всего хлоридный фронт достигает водопропускной трубы на внешних краях крайних секций, поэтому деградация железобетона начинается именно в этих местах. Со временем коррозия железобетона трубы распространяется к центру сооружения вглубь насыпи. Объем хлоридных реагентов в районе обочин больше, чем на откосах из-за отвода воды с поверхности автодороги, из-за этого агрессивный фронт под обочинами движется быстрее, чем под откосами. Это вызывает повреждение концов среднего участка (участок 2) водопропускной трубы. Однако относительная герметичность дорожной одежды не позволяет хлоридам проникнуть через насыпь и повредить центральную часть сооружения. В результате описанных выше хлоридных воздействий наиболее поврежденными частями трубы являются входной и выходной участки (участки 1 и 3), а степень их деградации уменьшается от наружной поверхности вглубь насыпи. По сечению трубы наибольшим повреждениям подвержена верхняя половина сооружения с внешней стороны (рис.5), однако для данного случая при выпадении осадков, содержащих агрессивные вещества, атмосферная влага потечет внутри по лотку водопропускного сооружения, тем самым, добавляя коррозионные повреждения внутри трубы в нижней ее половине.

Случай 2. В зимнее время, для борьбы с гололедом соевым раствором (или песчано-соевой смесью) обрабатывают поверхность автодороги. Химическая реакция соли со льдом протекает с выделением тепла, что в свою очередь растапливает лед, превращая его в воду, содержащую агрессивные реагенты. Жидкость, содержащая хлориды отводится за счет уклона автодороги в сторону обочин и впитывается в массу грунтовой насыпи. Дорожную одежду относительно обочин можно считать герметичной для проникновения воды. Таким образом, имеет место случай, когда хлоридные вещества проникают вглубь насыпи только через обочины автодороги. Этот случай схематично показан на рис. 6.

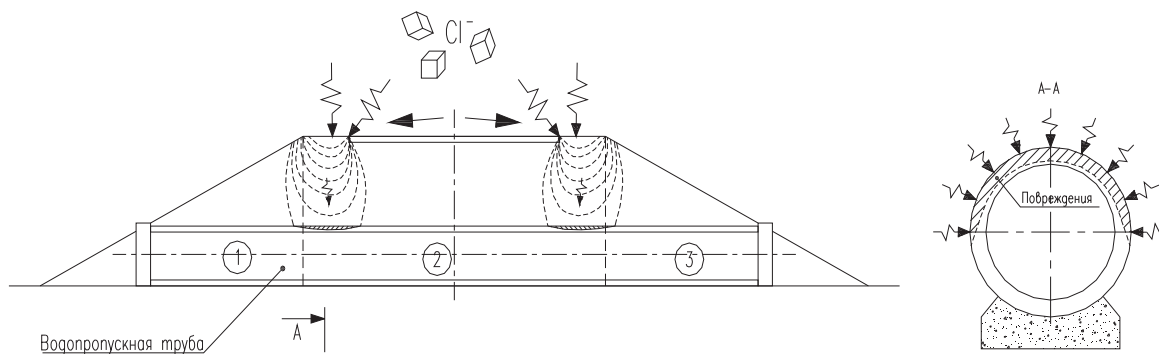


Рис. 6. Схематичное изображение случая, когда хлориды проникают только через обочины и не проходят через дорожную одежду



Основной хлоридный фронт движется в насыпи под обочинами, однако, за счет диффузионных процессов, идущих в грунте, зона повреждения водопропускной трубы чуть больше, чем зона проникания хлоридов вглубь насыпи. Наиболее поврежденным оказывается средний участок (участок 2), особенно его края, находящиеся под обочинами автодороги. Входной и выходной участки повреждаются значительно меньше. По сечению максимальным коррозионным повреждениям подвержена верхняя половина трубы. Существует вероятность движения воды, содержащей агрессивные вещества, внутри трубы, нанося повреждения нижней части (лотку) водопропускного сооружения.

Случай 3. Подобно случаю 2 применение антиобледенителей, содержащих хлориды, в зимнее время года приводит к образованию талой воды, насыщенной агрессивными веществами. Однако, в данном случае дорожная одежда имеет существенные повреждения и водоотвод с поверхности дороги в сторону обочин не осуществляется. Талая агрессивная вода задерживается на поверхности автодороги и постепенно проникает через слои дорожной одежды вглубь земляного полотна. Этот случай схематично показан на рис. 7.

Проходя через слои дорожной одежды в поврежденных местах, хлоридные реагенты наносят дополнительные повреждения дорожному покрытию. Агрессивный фронт проникает через насыпь почти равномерно. Основной поток хлоридных реагентов движется к центральной части водопропускной трубы. Достигнув поверхности водопропускного сооружения, фронт начинает проникать вглубь железобетона трубы, разрушая его структуру. В результате действия хлоридов значительные повреждения наносятся центральной части тела трубы (участок 2). Крайние участки (участок 1 и 3) повреждаются существенно меньше. По сечению водопропускной трубы основные повреждения от хлоридных воздействий наносятся верхней половине тела трубы.

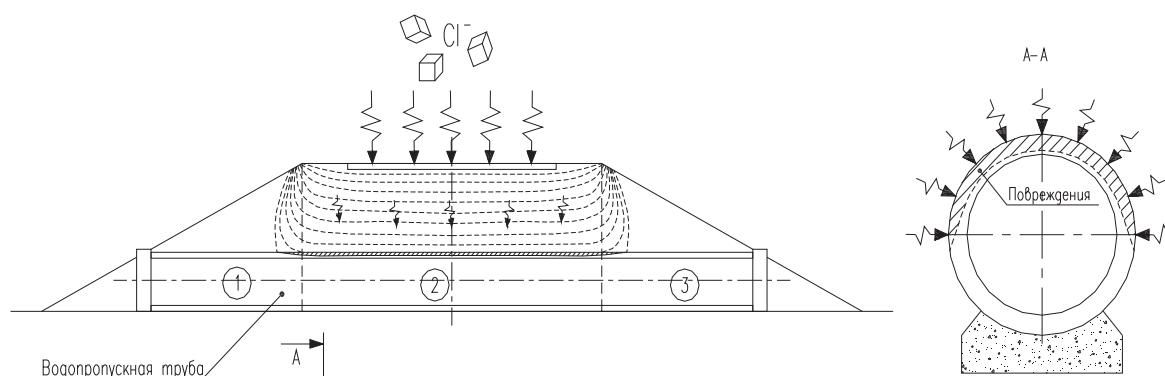


Рис.7. Схематичное изображение случая, когда агрессивный фронт проникает только через дорожное полотно автодороги

Случай 4. Агрессивная влага проникает одинаково, как через дорожную одежду, так и через откосы грунтовой насыпи. Эта ситуация может иметь место во время атмосферных осадков, а также в случае, если насыпь находится в прибрежных районах, воздух которых насыщен хлоридными реагентами. Поверхность дорожной одежды негерметична из-за имеющихся повреждений асфальтового покрытия (трещины, выбоины и т.п.). Этот случай схематично показан на рис. 8.

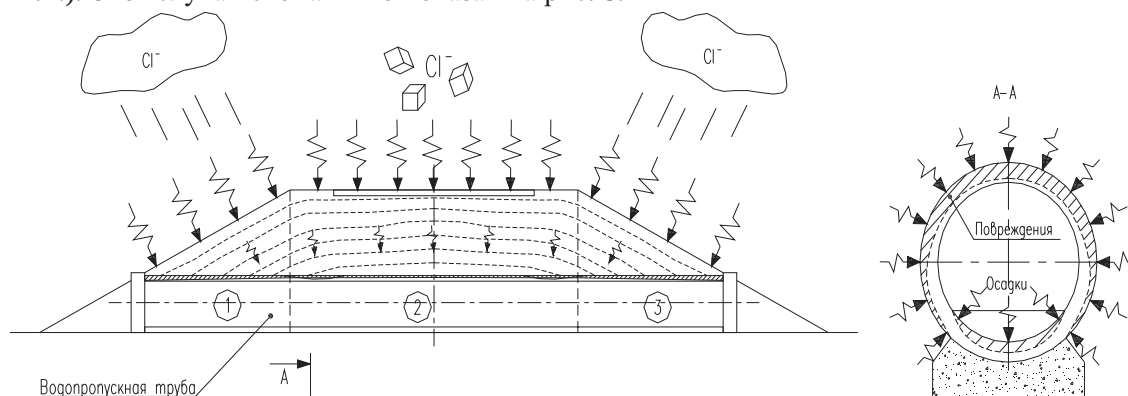


Рис.8. Схематичное изображение случая, когда хлориды проникают в насыпь по всем направлениям

Хлоридный фронт проникает в насыпь одновременно, как и с поверхности откосов, так и с поверхности дорожной одежды. Однако более плотные слои дорожной одежды по сравнению с грунтом откосов земляной насыпи задерживают продвижение фронта на некоторое время. Хлориды начинают



повреждать железобетон водопропускной трубы с краев сооружения (участки 1 и 3), фронт коррозии движется к центру тела трубы вглубь насыпи. В поперечном сечении трубы агрессивный фронт проникает преимущественно через верхнюю половину водопропускной трубы (рис.8). Положение может усугубляться протеканием внутри трубы воды, насыщенной хлоридами. В результате внутренняя поверхность водопропускной трубы подвергается агрессивным воздействиям, особенно ее нижняя половина.

Проведенный анализ схематизированных условий работы железобетонных водопропускных труб на действие нагрузок и агрессивных эксплуатационных сред позволяет отметить следующее. Силовые воздействия от временных и постоянных нагрузок оказывают наибольшее влияние на средний участок тела трубы (участок 2), тем самым являясь причиной многих существенных повреждений: осадки звеньев, расхождение швов между секциями трубы и так далее. Хлоридные агрессивные среды действуют преимущественно на крайних участках водопропускной трубы (участок 1 и 3), нанося наибольшие повреждения входным и выходным участкам. Величину силовых и агрессивных воздействий на водопропускную трубу, рассматривая ее малый по длине участок (секцию), можно считать равномерным в продольном направлении. Исходя из вышесказанного, можно рассматривать отдельные секции трубы с действующими на них силовыми и хлоридными факторами, зависящими от местоположения рассматриваемого участка, и рассчитывать секции методами строительной механики с учетом происходящих деградиационных процессов[1].

Кроме того, с нашей точки зрения, расчет водопропускных труб по примитивным расчетным схемам, когда рассматривается кольцо, нагруженное некими сосредоточенными силами, создает иллюзию расчета, но не дает никакой полезной информации и напряженно-деформированном состоянии трубы. Ведь в реальных условиях водопропускная труба работает как цилиндрическая оболочка под действием сложной, меняющейся во времени нагрузки, в материале трубы протекают деградиационные процессы, приводящие в случае железобетона к коррозии арматуры и деструкции бетона с образованием как продольных коррозионных (вдоль арматуры)[2], так и поперечных(силовых) трещин. В результате материал трубы находится в сложном (как минимум плоском) напряженном состоянии, для моделирования которого необходимо применять либо общую теорию оболочек, либо, в ряде случаев, теорию оболочек средней длины В.З.Власова [3].

Список литературы:

- 1.Овчинников И.И., Наумова Г.А. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами. Волгогр. гос. архит. – строит.ун-т. Волгоград. Изд- во ВолгГАСУ. 2007. 272 с.
- 2.Овчинников И.И., Калиновский, М.И. Модель деформирования железобетонной водопропускной трубы при действии на нее произвольной нагрузки и агрессивной хлоридсодержащей среды //Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. М. 2009. - Вып. 22/2. - С. 186-200.
- 3.Овчинников И.И. Моделирование процесса появления коррозионных трещин в железобетонных элементах конструкций в условиях хлоридной агрессии// Региональная архитектура и строительство. 2011. №1 (10). Пенза. С. 72 – 79.



УДК 628.113

Осокин И.А., Пермикин А.С

О ПРОБЛЕМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОФРИРОВАННЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ ПОД НАСЫПАМИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Анотація. В статті проведено аналіз роботи гофрованих водопропускних труб, що експлуатуються в Уральському регіоні, на підставі натурного обстеження, також проведено розрахунок за методикою, представленою в ОДМ 218.2.001-2009. Результати розрахунку зіставлені з результатами обстеження, зроблені висновки.

Ключові слова: гофрована водопропускних труб, обстеження, розрахунок, робота конструкції.

Аннотация. В статье проведен анализ работы гофрированных водопропускных труб, эксплуатируемых в Уральском регионе, на основании натурного обследования, а также проведен расчет по методике, представленной в ОДМ 218.2.001-2009. Результаты расчета сопоставлены с результатами обследования, сделаны выводы.

Ключевые слова: гофрированная водопропускная труба, обследование, расчет, работа конструкции.

Annotation. in article the analysis of work of the goffered water throughput culverts maintained in Uralsk region, on the basis of natural inspection is carried out, and also calculation on by a technique presented in ОДМ 218.2.001-2009 is carried out. Results of calculation are compared with results of inspection, conclusions are drawn.

Keywords: the goffered water throughput pipe, inspection, calculation, design work.

В последние 5 лет большую популярность среди строителей набрали водопропускные трубы и другие искусственные сооружения, выполненные из гофрированного металла. Однако, конструкции из гофрированного металла известны уже более ста лет. К неоспоримым преимуществам данных сооружений относятся: относительно небольшой вес элементов конструкции, относительная простота сборки, меньшие, по сравнению с железобетонными конструкциями, сроки возведения, привлекательный внешний вид. Однако, опыт их применения остается не всегда успешным о чем свидетельствуют дефекты, наблюдаемые на трубах различных годов постройки, эксплуатируемых под насыпями автомобильных и железных дорог Уральского региона.

В силу особенностей своей конструкции и сложности полного соблюдения технологического цикла, металлические гофрированные водопропускные трубы, в ходе жизненного цикла, могут утратить значительную часть своих эксплуатационных свойств. Например, потерять проектную геометрию, что приведет к перераспределению усилий, появлению ненормативных напряжений, и, как следствие, дальнейшему развитию дефекта.

В подтверждении данного предположения, приводим результаты обследования металлических гофрированных труб, выполненные на территории Свердловской области в октябре-декабре 2011 г.

Для получения более полной информации о работе сооружений под разной нагрузкой были обследованы водопропускные трубы, эксплуатируемые под насыпями автомобильных и железных дорог. В данной статье приведены данные, полученные в ходе обследования одной железнодорожной трубы эксплуатируемой на станции Стриганово Свердловской ж.д. и пяти автодорожных труб (в том числе двух двухочковых), эксплуатируемых на автомобильной дороге Артемовский – Зайково.

В результате выполненных обмерных работ установлено, что все трубы имеют одинаковый диаметр и геометрию гофрированного листа. Диаметр составляет 1,5 м (по средней линии гофров), геометрия гофрированного листа представлена на рис.1

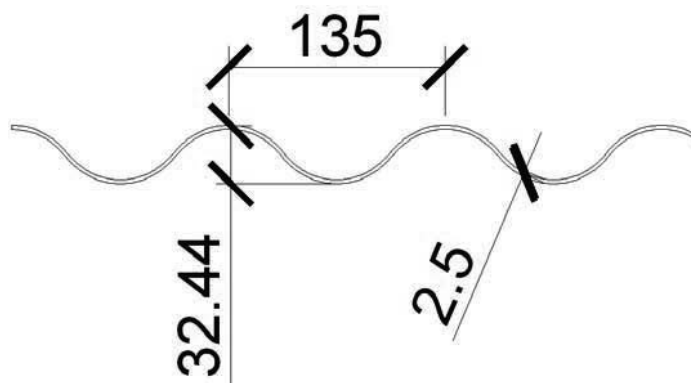


Рисунок - 1 Геометрия гофрированного листа

Длина труб составляет от 20 до 30 м. Трубы выполнены без оголовков со срезом перпендикулярно оси трубы. Насыпи выполнены из супесей и суглинков, залегающих в данной местности. Высота засыпки различна, и изменяется в пределах от 1 до 5,5 м.

В ходе обследования были выявлены следующие дефекты:

– продольный прогиб трубы имеющий наибольшее значение в зоне приложения временной нагрузки от подвижного состава, составляющий для автодорожной трубы до 140 мм, для железнодорожной трубы до 350 мм.

На рис. 2 представлен прогиб железнодорожной трубы.



Рисунок - 2 Прогиб железнодорожной трубы

– оваллизация тела трубы. В конструкциях автодорожных труб оваллизация составила до 20 мм, а в железнодорожной трубе до 240 мм. В двухчочковых автодорожных трубах наблюдается ассиметричная оваллизация. Данный дефект представлен на рис. 3.





Рисунок - 3 Овализация тела трубы

Деформации тела трубы привели к появлению местных просадок полотна проезжей части над трубами.

Помимо данных дефектов которые свидетельствуют о неправильной работе конструкции, были обнаружены также и другие дефекты: неправильная сборка звеньев железнодорожной трубы, нарушение обмазочной гидроизоляции и коррозия, местные погибы и разрывы, заиливание и обводнение отверстия трубы. Данные дефекты представлены на рис. 4,5.



Рисунок - 4 Нарушение обмазочной гидроизоляции и коррозия



Рисунок - 5 Местный разрыв тела трубы





По результатам обследования можно сделать вывод о неправильной работе сооружений данного типа. Причинами этого могут быть несоблюдение технологического цикла, а также неточности методики расчета, приведенной в нормативной базе РФ.

Для уточнения данного предположения был выполнен расчет железнодорожной трубы (как имеющей наиболее выраженные дефекты) по методике, представленной в ОДМ 218.2.001-2009.

В качестве грунта засыпки был принят тугопластичный суглинок с модулем деформации $E=8\text{Мпа}$ и углом внутреннего трения $\varphi=15^\circ$. Размеры трубы и характеристики гофрированного листа принимаем по результатам обмеров: шаг между волнами 135 мм, высота листа 35 мм, толщина 2,5 мм, диаметр-1,5 м.

По результатам расчета конструкции по предельному равновесию было выявлено, что расчетная несущая способность трубы составляет:

$$q = q_{1,р} \cdot K_{у,з} = 0,33 \cdot 4,42 = 1,4586 \text{ кгс/см}^2 = 145,86 \text{ кН/м}^2, \quad (1)$$

где:

$q_{1,р}$ - расчетная несущая способность гофрированной трубы вне грунта для рекомендуемых сталей;

$K_{у,з}$ - коэффициент увеличения несущей способности гофрированной трубы за счет упругого отпора окружающего грунта.

Интенсивность нагрузки, действующей на конструкцию, составляет:

$$P_{\Sigma} = P_{\gamma} + P_{\nu} = 0,395 + 0,805 = 1,2 \text{ кгс/см}^2 = 120 \text{ кН/м}^2, \quad (2)$$

где:

P_{γ} - интенсивность постоянной нагрузки;

P_{ν} - интенсивность временной нагрузки.

Как видно из результатов расчета интенсивность действующих нагрузок не превышает расчетную несущую способность гофрированной трубы.

Проверка общей устойчивости формы поперечного сечения гофрированной трубы:

$$\frac{N}{\varphi \cdot F} = \frac{93}{0,74 \cdot 0,29} = 433,4 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \leq m_2 \cdot R_0 = 0,7 \cdot 1900 = 1330 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}, \quad (3)$$

где:

N - расчетное осевое сжимающее усилие на единицу длины стенки трубы;

F - площадь продольного сечения стенки на единицу длины трубы;

m_2 - коэффициент условий работы, учитывающий условность расчетной схемы и начальные несовершенства конструкции, принимается равным 0,7;

R_0 - основное расчетное сопротивление стали при действии осевых сил;

φ - коэффициент понижения несущей способности, вводимый для предотвращения потери устойчивой формы равновесия гибкой гофрированной трубы в упругой грунтовой среде.

По результатам расчета условие устойчивости обеспечено.

Определение предельных деформаций поперечного сечения металлической гофрированной трубы.

$$\Delta \cdot D_{\text{густ}} = \frac{q_{\text{густ}} \cdot D^3}{0,96EI + 0,0053E_{\text{гп}}D^3} = \frac{1,1 \cdot 0,893 \cdot 150^3}{0,96 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,4025 + 0,0053 \cdot 81,5 \cdot 150^3} = 1,48 \text{ см}, \quad (4)$$



где

$q_{пред}=1,1q_p$ - нормативная несущая способность металлической трубы;

$E=2,1 \cdot 10^6$ кгс/см² - модуль упругости стали;

I - момент инерции продольного сечения стенки на единицу длины металлической трубы;

D - диаметр трубы.

Условие предельных деформаций:

$$\Delta D'_{пред} \leq \frac{M_{пл} D^3}{6EI} = 2,45 \text{ см}, \quad (5)$$

где

$M_{пл}$ - изгибающий момент в стенке МГТ, соответствующий образованию пластического шарнира.

Уменьшение вертикального диаметра по формуле:

$$\Delta D_{пред} = \Delta D'_{пред} \left(\frac{249 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{G}} \right) = 2,5 \text{ см}, \quad (6)$$

где

G - обобщенный показатель жесткости взаимодействующей системы "конструкция-грунт".

По результатам расчета деформации составляют:

- в горизонтальном направлении 1,48 см;
- в вертикальном направлении 2,50 см.

Что не превышает предельных значений.

Сопоставив результаты выполненных в соответствии с ОДМ 218.2.001-2009 расчетов с результатами обследований можно сделать вывод о несовершенстве приведенной в нормативной базе методики расчета.

Литература

1. ОДМ 218.2.001-2009. «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)». - Введ. 2009-06-21. - М. : Изд-во стандартов, 2009. - 201 с.



УДК 625.74
©2012

Петрович В.В., канд.тех.наук, Скрипник Т.В., канд.тех.наук, Скрипник В.Ю., аспірант

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ВОДОПЕРЕПУСКНОЇ ТРУБИ ПІД НАСИПОМ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Анотація. В статті розглянута побудова математичної моделі напруженого стану водоперепускної труби під невисоким насипом автомобільної дороги, як нескінченно довгої тонкостінної циліндричної оболонки, що навантажена колесами двох проїжджаючих автомобілів по двох смугах руху.

Ключові слова: математична модель, довга тонкостінна циліндрична оболонка, смуга руху, автомобільна дорога, невисокий насип.

Аннотация. В статье рассмотрено построение математической модели напряженного состояния водопропускной трубы под невысокой насыпью автомобильной дороги, как бесконечно длинной цилиндрической оболочки, которая нагружена колесами двух проезжающих автомобилей по двум полосам движения.

Ключевые слова: математическая модель, длинная тонкостенная цилиндрическая оболочка, полоса движения, автомобильная дорога, невысокая насыпь.

Annotation. Article contains mathematical model construction of the stress state of a culvert under low highway embankment, as infinitely a long cylindrical cover, which is stressed by two passing cars wheels on two lane road.

Keywords: A mathematical model, a long cylindrical cover, lane, highway, a low highway embankment.

Вступ. Циліндричні оболонки (тонкостінні циліндри) являють собою найбільш поширений вид оболонок обертання [1].

Теорія деформації циліндричних оболонок заснована на гіпотезах Кірхгофа–Лява, аналогічних гіпотезам, використовуваним в теорії вигину пластин [1], а саме:

1. Гіпотеза незмінності нормалей. Приймають, що нормалі до серединної поверхні оболонки не викривляються і залишаються перпендикулярними до деформованої серединної поверхні. Ця гіпотеза встановлює зв'язок між деформованим станом в довільній точці стінки оболонки і зміною геометрії її серединної поверхні і дозволяє таким чином звести дослідження деформації оболонки до дослідження деформації її серединної поверхні.

2. Гіпотеза про ненавискування одного шару оболонки на інший. Відповідно до цієї гіпотези, нормальні напруги в майданчиках, паралельних серединній поверхні, вважають рівними нулю, тобто напружений стан розглядають як плоский замість об'ємного.

Основна частина. Зазначені гіпотези виконуються досить задовільно за умови, що товщина оболонки мала в порівнянні з радіусом циліндра і що переміщення точок серединної поверхні малі в порівнянні з товщиною. Якщо найбільшу допустиму похибку розрахунку прийняти рівною 5%, то до тонкостінних слід віднести оболонки, товщина яких не перевищує $1/20$ (в окремих випадках $1/5$) радіусу.

Крім перерахованих гіпотез і припущень прийемо, що матеріал оболонки однорідний, ізотропний і підпорядковується закону Гука.

Введемо позначення: r – радіус циліндру (середній); h – товщина стінки циліндру; x – координата, що відрховується від торця в напрямку вісі циліндру; u , w – переміщення довільної точки серединної поверхні в осьовому і в радіальному напрямках.

Висловимо відносні деформації в довільному шарі оболонки, розташованому на відстані z від серединної поверхні, через переміщення (z будемо вважати додатним у напрямку до центру). На рис. 2.1 Зображено безмежно малий елемент оболонки до і після деформації.

Відносні деформації волокна ab в осьовому напрямку:

$$s_x = \frac{du + d\vartheta z}{dx} = \frac{du}{dx} + \frac{d^2w}{dx^2} z, \quad (1)$$

де $\vartheta = \frac{dw}{dx}$ – кут повороту нормалі.

Відносна деформація в окружному напрямку визначається як співвідношення прирощення



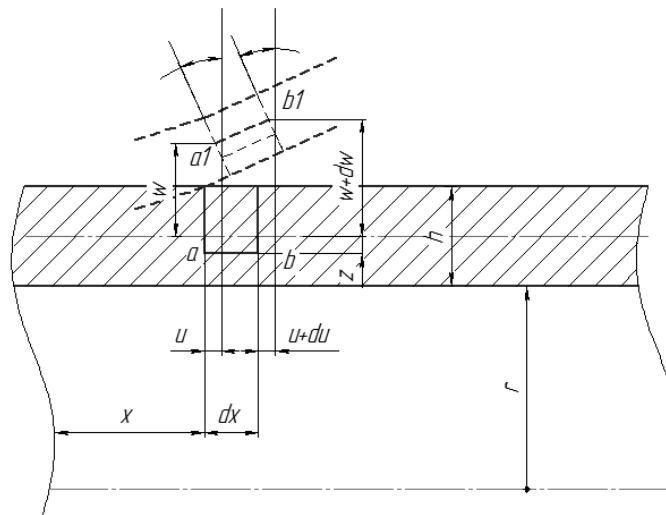


Рисунок 2.1 – Нескінченно малий елемент оболонки

довжини окружності, що проходить через довільну точку а, до початкової довжини, через тонкостінність буде мати вигляд:

$$\varepsilon_t = \frac{w}{r} \quad (2)$$

Перейдемо від деформацій до напружень. При $\sigma_z = 0$ формули закону Гука мають вигляд:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x - \mu \varepsilon_t); \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_t - \mu \varepsilon_x) \quad (4)$$

Підставивши в ці рівняння вирази деформацій отримаємо:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dx} + \frac{d^2 w}{dx^2} z + \mu \frac{w}{r} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{w}{r} + \mu \frac{du}{dx} + \mu \frac{d^2 w}{dx^2} z \right); \quad (6)$$

Перейдемо від напруг до внутрішніх силових факторів. При інтегруванні по товщині оболонки напруження σ_x, σ_t приводяться до нормальних зусиль і згинальних моментів M_x та M_t :

$$T_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dx} + \mu \frac{w}{r} \right); \quad (7)$$

$$T_t = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_t dz = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\frac{w}{r} + \mu \frac{du}{dx} \right); \quad (8)$$

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dz = D \frac{d^2 w}{dx^2}; \quad (9)$$

$$M_t = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_t z dz = \mu D \frac{d^2 w}{dx^2} = \mu M_x, \quad (10)$$

де D – згинальна жорсткість оболонки;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (11)$$



Виключивши з рівнянь (7) і (8) переміщення u , отримаємо вираз окружного зусилля T_t через w та T_x :

$$T_t = \mu T_x + \frac{Ehw}{r}. \quad (12)$$

Рівняння (10), (11) та (12) мають п'ять невідомих величин: M_x , M_t , T_x , T_t , w .

Щоб отримати невистачаючі рівняння, розглянемо рівновагу елементарного об'єму, виділеного з оболонки двома поздовжніми і двома поперечними перетинами. Крім сил T_x і T_t і моментів M_x , M_t , на елемент діють сили поверхневого навантаження.

З шести рівнянь рівноваги в даному випадку можна скласти тільки три: рівняння проєкцій сил на напрямки r та x і рівняння моментів відносно вісі y , дотичної до окружності:

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{T_t}{r} = p_1 \quad (13)$$

$$\frac{dT_x}{dx} = p_2 \quad (14)$$

$$\frac{dM_x}{dx} = Q \quad (15)$$

Решта рівнянь рівноваги задовольняються тотожно. При вирішенні отриманої системи рівнянь осьову силу T_x можна вважати відомою, так як вона може бути визначена заздалегідь за рівнянням (14). Дійсно, помноживши обидві частини рівняння на $2\pi r$ і проінтегрувавши по x , знайдемо:

$$2\pi r T_x = \int p_2 2\pi r dx + C \quad (16)$$

Це рівняння є рівнянням рівноваги частині оболонки, відтятою по колу $x = \text{const}$. Перша складова у правій частині рівності являє собою інтеграл від поверхневих осьових сил, друге – враховує сили, прикладені до торця.

Приведемо систему рівнянь деформацій і рівноваги до одного рівняння з одним невідомим. З рівняння (15), з урахуванням рівності (9) слідує:

$$Q = \frac{dM_x}{dx} = D \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (17)$$

Вирази (12) та (16) підставимо у рівняння (13), тоді:

$$p_1 r - Dr \frac{d^4 w}{dx^4} - \mu T_x - \frac{Ehw}{r} = 0 \quad (18)$$

або

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta w = -\frac{\mu T_x}{Dr} + \frac{p_1}{D}, \quad (19)$$

де

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 h^2}} \quad (20)$$

Отже, ґрунтуючись на [2] загальне рішення однорідного рівняння має вигляд:

$$\dot{w} = C_1 e^{(\beta + \beta i)x} + C_2 e^{(-\beta + \beta i)x} + C_3 e^{(-\beta - \beta i)x} + C_4 e^{(\beta - \beta i)x}$$

або

$$\dot{w} = e^{-\beta x} (C_2 e^{i\beta x} + C_3 e^{-i\beta x}) + e^{\beta x} (C_1 e^{i\beta x} + C_4 e^{-i\beta x}), \quad (21)$$

де C_1 , C_2 , C_3 , C_4 – постійні інтегрування (комплексні).



Зазвичай на практиці навантаження p_1 і p_2 або постійні, або змінюються по x , за лінійним або квадратичним законом. Обмежуючись тільки цими випадками і враховуючи, що при зазначених умовах $\frac{d^4 p_1}{dx^4} = 0$ та $\frac{d^4 T_x}{dx^4} = 0$ ($\frac{d^3 p_2}{dx^3} = 0$), отримаємо для $\bar{w}$ наступний вираз:

$$w = \frac{1}{4\beta^4} \left(-\frac{\mu T_x}{Dr} + \frac{p_1}{D} \right) = \left(p_1 - \frac{\mu T_x}{r} \right) \frac{r^2}{Eh} \quad (22)$$

Стосовно до розрахунку довгих оболонок вираз (21) доцільно перетворити таким чином [3]. Використовуючи формули Ейлера:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi; \quad e^{-i\varphi} = \cos\varphi - i\sin\varphi, \quad (23)$$

замінімо показові функції на тригонометричні, тоді вираз (18) набуде вигляду:

$$w = e^{-\beta x} (A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x) + e^{\beta x} (A_3 \sin \beta x + A_4 \cos \beta x) + \bar{w}, \quad (24)$$

де A_1, A_2, A_3, A_4 – нові постійні (дійсні).

Перша складова, що містить множник $e^{-\beta x}$, зі збільшенням x швидко згасає. Друга складова, що містить множник $e^{\beta x}$, навпаки, швидко зростає. Враховуючи, що радіальні переміщення w при великих значеннях x повинні залишатися кінцевими і малими, можна зробити висновок, що постійні A_3 і A_4 повинні бути дуже малі. В області, розташованій поблизу від початку координат, другим складовою можна знехтувати, тобто покласти $A_3 = A_4 = 0$; тоді:

$$w = e^{-\beta x} (A_1 \sin \beta x + A_2 \cos \beta x) + \bar{w}, \quad (25)$$

У такому вигляді функція придатна для області, розташованої біля краю при $x = 0$. Для області, що знаходиться біля другого краю друга складова не може бути відкинута, так як множник $e^{\beta x}$ приймає дуже великі значення.

Проте для другого краю можна обрати новий початок координат, розташувавши його на другому торці оболонки і направивши вісь x в протилежну сторону. Тоді можна знову скористатися виразом (25) і, визначивши нові постійні A_1 та A_2 отримати функцію w для області, розташованої біля другого краю оболонки.

З'ясуємо, при якій довжині оболонки її припустимо розглядати як довгу. Вважаючи гранично допустиму похибку розрахунку рівної 5% і помічаючи, що функції вигляду $e^{-\beta x} \sin \beta x$ та $e^{-\beta x} \cos \beta x$, а також їх похідні при $\beta x > 3$ приймають значення менше 0,05, укладаємо, що оболонку можна розглядати як довгу, якщо $\beta l \geq 3$; та $l \geq 2,5\sqrt{rh}$

При дотриманні цієї умови похибка рішення, отримана при застосуванні спрощеного виразу (25), не перевищує 5%.

Для практичних розрахунків довгих циліндричних оболонок, однак, більш зручно застосовувати формули, в яких постійні інтегрування виражені через деякі початкові параметри.

Приймемо за початкові параметри величини M_0 і Q_0 і виразимо через них постійні A_1 і A_2 .

Запишемо граничні умови

$$x = 0; \quad \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M_0}{D};$$

$$x = 0; \quad \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{Q_0}{D}.$$

За цими умовами знайдемо значення постійних:

$$A_1 = -\frac{M_0}{2D\beta^2}; \quad A_2 = \frac{M_0}{2D\beta^2} + \frac{Q_0}{2D\beta^3} \quad (26)$$

Використовуючи залежності (9), (10) і (11), отримаємо такі вирази для радіального переміщення w , кута нахилу нормалі ϑ і внутрішніх силових факторів M_x , M_t і T_t :



$$w = \frac{M_0}{2D\beta^2} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + \frac{Q_0}{2D\beta^3} e^{-\beta x} \cos \beta x + \bar{w} \quad (27)$$

$$\vartheta = \frac{dw}{dx} = -\frac{M_0}{D\beta} e^{-\beta x} \cos \beta x - \frac{Q_0}{2D\beta^3} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + \frac{d\bar{w}}{dx} \quad (28)$$

$$M_x = D \frac{d^2 w}{dx^2} = M_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + \frac{Q_0}{\beta} e^{-\beta x} \sin \beta x + D \frac{d^2 \bar{w}}{dx^2} \quad (29)$$

$$Q = -2M_0 \beta e^{-\beta x} \sin \beta x + Q_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + D \frac{d^3 \bar{w}}{dx^3} \quad (30)$$

$$T_t = 2r\beta^2 \left[M_0 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + \frac{Q_0}{\beta} e^{-\beta x} \cos \beta x \right] + p_1 r \quad (31)$$

де $\bar{w}$ – частинний розв'язок диференціального рівняння з правою частиною. Значення функцій, що входять у вирази (27) – (31), дані в табл. 8.1 [4].

Для побудови математичної моделі напруженого стану водоперепускної труби під насипом автомобільної дороги від рухомого складу уявимо трубу під насипом не більш 0,5 м, як безкінечно довгу тонкостінну циліндричну оболонку, що навантажена колесами двох проїжджаючих автомобілів по двох смугах руху, оскільки розглядається дорога III категорії, згідно [5]. На рис. 2 зображені схеми навантаження, що діють на існуючих дорогах АК-15, НК-100. Величина навантаження на задню вісь (більше навантаження), згідно [6] для АК-15 становить 147,15 кН, НК-100 – 245 кН, на колесо АК-15 – 73,575 кН, НК-100 – 122,5 кН.

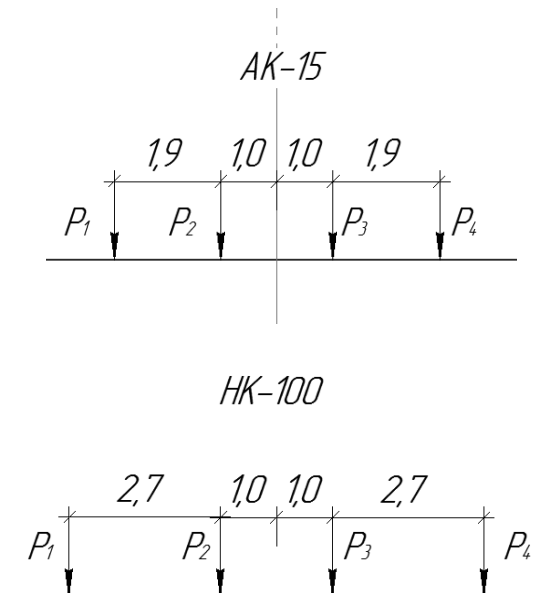


Рисунок 2 – Розподіл навантаження для АК-15 та НК-100

До розгляду приймаємо труби найбільш поширеного діаметру 1,00; 1,25; 1,5 м.

Для правої половини труби, враховуючи симетрію навантаження, маємо такі граничні умови [7]:

При $x=0$ $\frac{dw}{dx} = 0$; при $x=0$ $Q_0 = -\frac{P}{2}$. З цих умов, на підставі рівняння визначається згинальний момент M_x в початковому перерізі:

$$M_0 = -\frac{Q_0}{2\beta} = \frac{P}{4\beta}$$

Вирази для w , M_x відповідно до формул (2.46) – (2.50) та відповідно до [8] мають вигляд:

$$w = \frac{Pr^2\beta}{2Eh} e^{-|\beta x|} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (32)$$

$$M_x = \frac{P}{4\beta} e^{-|\beta x|} (\sin \beta x - \cos \beta x) \quad (33)$$



Епюри w, M_x побудовані згідно принципу незалежності дії сил. Значення координат розраховано через проміжок кожні 0,05 м за допомогою MS Excel та визначено, що із збільшенням діаметру труби збільшується величина вигину.

Щоб зробити висновок чи витримає залізобетонна конструкція труби навантаження від автотранспорту розраховано нормальне навантаження для кожного діаметру від навантажень АК-15 та НК-100 за формулою відомою з курсу опору матеріалів [9]:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{w_t}, \quad (34)$$

Результати занесемо у таблицю 2.1. Враховуючи, що у 1960-х роках використовувався бетон класу В20–В22,5 [10], з міцністю на стиск 105,00 та 120,00, то труби діаметром 1,00 м та 1,25 м підлягають негайному ремонту [11]. Труби діаметром 1,00 м та 1,25 м не витримують навантаження за розрахунковим моментом. Усе це підтверджують натурні обстеження, з яких видно, що найбільша кількість труб у незадовільному стані саме діаметром 1,00 м та 1,25 м.

Таблиця 1–Результати розрахунку на міцність за максимальним згинаючим моментом

Навантаження	Діаметр	M_{max} , кНм	σ_{max} , МПа	$M_{розр}$, кНм
АК-15	1,00 м	4,288	154,11	3,85
	1,25 м	4,798	107,704	6,02
	1,5 м	5,25	80,526	8,66
НК-100	1,00 м	5,253	188,96	4,72
	1,25 м	5,787	129,91	5,37
	1,5 м	6,43	98,63	10,61

Прогнозування на основі побудованої моделі можливо тільки в тому випадку, якщо модель адекватна об'єкту-оригіналу. Найкращим засобом перевірки адекватності моделі є порівняння прогнозних і фактичних значень, але в цьому випадку необхідно дочекатись прогнозного періоду. На етапі прогнозування оцінити надійність моделі можна за допомоги статичних показників [12].

Існує декілька показників, які добре характеризують точність побудованої моделі. Один з них MAPE – середня відносна похибка (mean absolute percent error). Сутність показника видно з назви. Середня відносна похибка показує, на скільки відсотків в середньому теоретичні рівні (розраховані за допомоги моделі) відрізняються від фактичних рівнів ряду [13].

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{\hat{Y}_t - Y_t}{Y_t} \right|}{n} \cdot 100 \quad (35)$$

де n – число рівнів ряду;

Y_t – i -тий рівень ряду;

$\hat{Y}_t$ – i -тий теоретичний рівень ряду.

Для розрахунку теоретичних рівнів ряду підставлено значення діаметрів у рівняння тренду, розраховане у MS Office Excel, результати внесено у табл. 2.2. Рівняння тренду має наступний вигляд для навантаження АК-15:

$$y = 2,369 \ln(d) + 4,282 \quad (36)$$

для навантаження НК-100:

$$y = 2,899 \ln(d) + 5,246 \quad (37)$$

Висновки. Отже, ми отримали значення MAPE=0,702% для схеми із навантаженням АК-15, та MAPE=0,742% для навантаження НК-100. Це говорить про те, що теоретичні рівні (розраховані за моделлю) в середньому відхиляються від фактичних на 0.7%. Згідно вимог [3] максимальний відсоток



похибки розрахунків для оболонок становить 5%, отже можна зробити висновок, що модель є якісною [14].

Таблиця 2 – Розрахунок середньої відносної похибки

Діаметр (навантаження)	Момент	$\hat{Y}_i$	$\hat{Y}_i - Y_i$	$\frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i}$	$\left \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right $
1,00 (АК-15)	4,288	4,282	-0,006	-0,006	0,006
1,25 (АК-15)	4,798	4,810627	0,012627	0,0101	0,0101
1,5 (АК-15)	5,25	5,242547	-0,00745	-0,00497	0,00497
MAPE					0,702%
1,00 (НК-15)	5,253	5,246	-0,007	-0,007	0,007
1,25 (НК-15)	5,878	5,8929	0,0149	0,01192	0,00954
1,5 (НК-15)	6,43	6,4214	-0,0086	-0,00573	0,00573
MAPE					0,742%

Література:

1. Абовский Н. П., Андреев Н. П., Деруга А. П. Вариационные принципы теории упругости теории оболочек, - М.: Наука, 1987. – 288 с.
2. Водопропускные трубы под насыпями / Под ред. О. А. Янковского – М.: Транспорт, 1982 – 232 с.
3. Саргасян А. Е., Демченко А. Т., Дворянчиков Н. В., Джинчвеланшвили Г. А. Строительная механика. Основы теории с примерами расчетов: Учебник/Под. ред. А. Е. Саргасяна. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 416 с.
4. ДБН В.1.2–15:2009 Мости та труби. Навантаження і впливи, - К.:Мінрегіобуд України., 2009.–276 с.
5. ДБН В.2.3–14:2006. Мости і труби. Правила проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 367 с.
6. ДБН В.1.2–15:2009 Мости та труби. Навантаження і впливи, - К.:Мінрегіобуд України.,2009. –276 с.
7. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения / кантор Б. Я.; Отв. ред. Подгорный А. Н.; АН УССР. Ин-т проблем машиностроения. – К.: Наук. думка, 1990. – 136 с.
8. Гольденвезер А. Л. Теория упругих тонких оболочек, - М.: Стройиздат, 1953. – 544 с.
9. Сопротивление материалов: Учебник для вузов / Под ред. акад. АН УССР Писаренко Г. С. – 4-е изд., перед. и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.
10. ДБН В.2.3-22:2009 «Мости і труби. Правила проектування» Мінрегіонбуд України, К.,2009. –73 с.
11. Сопротивление материалов: ученик / М. Д. Поскребка. – Минск: Высш. шк., 2007. – 797 с.
12. Златопольский Д. М. 1700 заданий по MS Excel. / Д. М. Златопольский – СПб.: БВХ, 2003. – 544 с.
13. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. □ М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
14. Сиденко В.М. Грушко И.М. Основы научных исследований. Х.: Вищ. шк. – 1977. – 200 с.



Савенко В.Я., д-р техн. наук, Славінська О.С., д-р техн. наук, Л.П. Бондаренко, канд. техн. наук

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОДОВІДВЕДЕННЯ З МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО НИХ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. В роботі запропоновано метод оцінки впливу споруд дорожньо-транспортного комплексу на екологічний стан поверхневих вод. Метод розроблений на основі числової реалізації тривимірної математичної моделі, що враховує просторову та анізотропну структуру водного потоку в зоні змішування. Наведено приклад числового розрахунку переносу домішок з поверхні реального мостового переходу.

Ключові слова: мостовий перехід, водні ресурси, екологічний стан, математичне моделювання, числові методи

Аннотация. В работе предложен метод оценки влияния сооружений дорожно-транспортного комплекса на экологическое состояние поверхностных вод. Метод разработан на основе численной реализации трехмерной математической модели, учитывающей пространственную и анизотропную структуру водного потока в зоне смешения. Приведен пример численного расчета переноса примеси с поверхности реального мостового перехода.

Ключевые слова: мостовой переход, водные ресурсы, экологическое состояние, математическое моделирование, численные методы

Annotation. This paper proposed a method of assessing the impact of road transport facilities complex on the ecological status of surface waters. The method is based on the numerical realization of three-dimensional mathematical model that considers the spatial and anisotropic structure of the water flow in the mixing. An example of numerical calculation of the transfer of impurities from the surface of the real bridge.

Keywords: bridge, water resources, ecological conditions, mathematical modeling, numerical methods

Вступ. Охорона водного середовища майже не щодня ставить перед інженерами-проектувальниками цілий ряд складних задач, пов'язаних з необхідністю проведення екологічних експертиз проєктованих об'єктів та організації відповідних охоронних заходів.

Зокрема, така проблема є актуальною та злободенною і в дорожньо-транспортній галузі при розробці проєктів будівництва та реконструкції ділянок автомобільних доріг і мостових переходів, які поряд з промисловими об'єктами є досить потужними джерелами забруднення поверхневих водних ресурсів. Ключовим моментом на шляху вирішення даної проблеми є всебічне вивчення механізму переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках та розвиток відповідної теоретичної бази, що дозволить більш точно прогнозувати стан водоймищ і рік, а також дасть можливість підвищити науково-інженерний рівень та обґрунтованість заходів, спрямованих на їх збереження.

Аналіз публікацій На сьогоднішній день одним з найбільш ефективних методів дослідження процесів динаміки і переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках є їх математичне і числове моделювання. Різноманітні математичні моделі і методи розрахунку переносу домішок у відкритих потоках запропоновано і реалізовано в роботах А.М. Айтсама, Х.А. Вельнера, Л.Л. Пааля, О.Ф. Васильєва, В.І. Квона, Й.Д. Родзіллера, Є.В. Бруяцького, І.А. Шеренкова, А.П. Нетюхайла, М.М. Беляєва, Ю.А. Малевича, В.К. Хруща, С.О. Іваненка, П.П. Корявова, О.М. Мілітєєва, Т.Е. Куллеса, Р.Е. Тамсалу, Б. Лаундера, А. Морса, В. Роді, Д. Сполдінга, А. Растоджі та інших вчених.

Однак, виконаний аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день дослідження динаміки і міграції домішок в природних руслах проводиться переважно в рамках різноманітних варіантів одновимірних або двовимірних моделей, здатних описувати ці процеси лише в областях досить віддалених від джерела викиду, залишаючи відкритим питання взаємодії струминного і безнапірного потоків безпосередньо в зоні змішування, де течія має складну просторову й анізотропну структуру. Існуючі ж тривимірні моделі не враховують складний анізотропний характер течії в природних потоках, ґрунтуються на припущенні про ізотропність коефіцієнтів турбулентної в'язкості і дифузії, що з одного боку значно спрощує математичний аналіз рівнянь турбулентного руху і переносу, з іншого – приводить до спотворення реальної картини течії, особливо поблизу джерела викиду

Не достатня вивченість процесу взаємодії струминного і безнапірного потоків в ближній зоні викиду забруднюючих речовин у відкритий потік та відсутність строгої математичної моделі для розрахунку основних характеристик потоку в ній, істотно впливають на правильність розрахунків переносу забруднюючих речовин в цілому і приводять до виникнення ряду труднощів при розв'язуванні конкретних інженерних задач. Зважаючи на ці факти в роботах [1, 2] розроблена методика розрахунку основних характеристик потоку поблизу джерела викиду забруднюючих речовин у відкритий потік, що ґрунтується на числовій реалізації тривимірної нестационарної математичної моделі і дає можливість визначати її геометричні параметри в процесі розрахунку.



Постановка і розв'язання задачі 3 метою врахування фізичних особливостей переносу домішок у природних водотоках, в роботах [1, 2] була розроблена відповідна тривимірна математична модель, що враховує вплив початкового імпульсу забрудненої струмینی, архімедові сили, анізотропний стан турбулентності і т.п.:

$$\frac{\partial \bar{v}_1}{\partial t} + \frac{1}{2} D_1 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + \frac{1}{2} D_2 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + \frac{1}{2} D_3 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{2\rho} \frac{d \bar{p}_x}{dx_1} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}_1' \bar{v}_2') + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}_1' \bar{v}_3'), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_2}{\partial t} + \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_1} + \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_2} + \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3} + D_4 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + D_5 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + D_6 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}_2'^2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}_2' \bar{v}_3'), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_3}{\partial t} + \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_1} + \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_2} + \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_3} + D_7 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + D_8 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + D_9 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_3} - \beta g \Delta \bar{C} + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}_2' \bar{v}_3') + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}_3'^2). \quad (3)$$

$$D_i = \left[\bar{v}_{13\text{зовн}} \frac{\bar{v}_i}{\bar{v}_1} - \frac{\bar{v}_1' \bar{v}_i'}{\bar{v}_1} \right], i = \overline{1,3}, D_j = \left[\frac{\bar{v}_j \bar{v}_{23\text{зовн}}}{\bar{v}_1} - \frac{\bar{v}_2 \bar{v}_j}{\bar{v}_1} - \frac{\bar{v}_2' \bar{v}_j'}{\bar{v}_1} \right], j = \overline{4,6}, D_k = \left[\frac{\bar{v}_k \bar{v}_{33\text{зовн}}}{\bar{v}_1} - \frac{\bar{v}_2 \bar{v}_k}{\bar{v}_1} - \frac{\bar{v}_2' \bar{v}_k'}{\bar{v}_1} \right], k = \overline{7,9}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad}(\bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{v}_i' \bar{C}'). \quad (5)$$

де $\bar{v}_i$, $\bar{v}_i'$ – осереднені та пульсаційні складові швидкості; $\bar{C}$ – осереднене значення концентрації забруднюючої речовини.

Модельна система рівнянь (1)-(5) є параболізованою. Еліптичний характер течії у повздовжньому напрямку врахований за допомогою апроксимації тиску по Госману і Сполдінгу, згідно якої статичний тиск в струмені представляється у вигляді суми двох складових $\bar{p}_x$ і $\bar{p}$, причому складова тиску $\bar{p}_x$ визначається лише з рівняння руху в повздовжньому напрямку, а складова тиску $\bar{p}$ змінюється в поперечному перерізі струмینی [3].

Складова тиску $\bar{p}$ змінюється в поперечному перерізі і описується рівнянням Пуассона еліптичного типу в кожному поперечному перерізі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x_3^2} = \rho \left[-\frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial \bar{v}_2}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(D_4 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(D_5 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(D_6 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (-\bar{v}_2'^2) + \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (-\bar{v}_2' \bar{v}_3') - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial \bar{v}_3}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(D_7 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(D_8 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(D_9 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} (\beta g \Delta \bar{C}) + \frac{\partial}{\partial x_3 \partial x_2} (-\bar{v}_2' \bar{v}_3') + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} (-\bar{v}_3'^2) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Замикання математичної моделі (1)-(6) здійснено на основі спільного використання модифікованої к-ε- моделі турбулентності [2]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = c_\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \left(c_{1\varepsilon} \frac{P}{\varepsilon} - c_{2\varepsilon} \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

і алгебраїчних співвідношень для турбулентних напружень і турбулентних потоків маси [2]:

$$\overline{v_i' v_j'} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k \frac{c_1 - 1}{c_1 - 1 + P/\varepsilon} + \frac{1 - c_2}{c_1 - 1 + P/\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \left(P_{ij} + \frac{c_2}{1 - c_2} \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (9)$$

$$\overline{v_i' C'} = \frac{1}{c_{1c} - 1 + P/\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \left[(1 - c_{2c}) P_{ic} - \overline{v_i' v_j'} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right], \quad \overline{C'^2} = -\frac{2}{c_c} \frac{k}{\varepsilon} \overline{v_i' C'} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i}, \quad (10)$$



$$P_{ij} = -\overline{v'_i v'_j} \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_k} - \overline{v'_j v'_k} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_k} + \beta (g_j \overline{v'_i C'} + g_i \overline{v'_j C'}), \quad (11)$$

$$P = -\overline{v'_i v'_j} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \beta g_i \overline{v'_i C'}, \quad P_{ic} = -\overline{v'_i C'} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_k} - \overline{v'_i v'_k} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_k} + \beta g_i \overline{C'^2}. \quad (12)$$

Використовуючи такий підхід, коефіцієнти турбулентної в'язкості і турбулентної дифузії вважаються анізотропними величинами і визначаються із співвідношень:

$$\nu_{ij}^t = -\frac{\overline{v'_i v'_j}}{\left(\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k}, \quad D_i^t = \frac{-\overline{v'_i C'}}{\partial \overline{C} / \partial x_i}. \quad (13)$$

Для розв'язання математичної моделі (1)-(13) був розроблений числовий метод на основі модифікованого Simple-подібного методу, методу Мак-Кормака і методу послідовної верхньої релаксації [4]. Метод доведений до обчислювальних програм для ЕОМ, тестованих на експериментальному і аналітичному матеріалі і призначених для розрахунку гідродинамічних полів, полів концентрацій домішок і турбулентних характеристик потоку в зоні змішування стічних вод з основним річковим потоком [4].

Числова реалізація Для інженерної практики запропонована математична модель з прийнятими початковими і граничними умовами була реалізована у вигляді програмного комплексу „RIVER”, який дає можливість:

- замінити тривалі та економічно не вигідні натурні і експериментальні дослідження процесів переносу домішок у відкритих потоках дешевим і ефективним комп'ютерним моделюванням;
- з мінімальними затратами і в короткий термін отримувати коректні числові значення гідродинамічних полів і полів концентрацій домішок в річках і водоймах;
- вибирати найбільш оптимальні варіанти водоохоронних заходів;
- обґрунтовувати місце розташування у відкритому потоці випускних споруд;
- прогнозувати наслідки різних аварійних ситуацій, пов'язаних з викидами домішок у відкриті потоки;
- проводити екологічні експертизи об'єктів дорожньо-транспортного комплексу як на стадії проектування, так і в процесі їх експлуатації.

Програмний комплекс складається з окремих модулів, що включають в себе шість функціонально незалежних, але повністю узгоджених між собою програмних одиниць (рис.1).

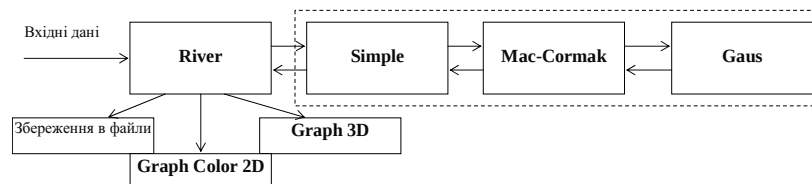


Рисунок 1 - Схема функціонування програмного забезпечення

Модуль River являє собою головний модуль обчислювального комплексу, який завантажує вхідні дані, будує просторову розрахункову сітку та проводить інтерполявання значень відповідних характеристик в розрахункових вузлах сітки. Далі модуль River активізує модуль розрахунку та формує результуючі файли даних. Модуль має інтуїтивний та зручний інтерфейс користувача, за допомогою якого проводиться введення вхідних даних, покроковий розрахунок значень відповідних характеристик потоку та перегляд проміжних результатів. Від користувача вимагається задавання наступних вхідних даних:

- а) гідрологічні і гідродинамічні особливості відкритого потоку, в який відбувається викид стічних вод (морфологічні характеристики і коефіцієнти шорсткості русла; витрата води у відкритому потоці; фонові концентрації домішок);
- б) конструктивні і технологічні особливості випуску стічних вод (місце розташування випускної споруди; форма і розміри випускних отворів; витрата води в початковому перерізі; концентрація домішок в стічних водах;
- в) розрахункові кроки $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta t$;
- г) константи $k - \varepsilon$ – моделі турбулентності та алгебраїчних співвідношень для турбулентних напружень



і турбулентних потоків маси.

В результаті роботи даного програмного забезпечення отримуються відповідні чисельні файли і графіки, що описують шукані величини в заданий момент часу в кожній точці розрахункової сітки.

Апробацію запропонованої математичної моделі, розрахункових алгоритмів та програмного комплексу „RIVER” здійснено шляхом співставлення результатів чисельних експериментів з натурними та експериментальними даними інших авторів, а також шляхом розв’язання тестових задач. Результати співставлення показали досить високу збіжність результатів, отриманих на основі комплексу „RIVER” з існуючими аналогами (відносна похибка не перевищила 18%).

Результати числових розрахунків В якості прикладу нижче наведено практичні аспекти застосування розробленої математичної моделі та програмного комплексу для прогнозування забруднення р. Канелка поверхневими стоками мостового переходу на автомобільній дорозі Київ-Одеса поблизу с. Соколівка.

Зворотні води, що формуються на території мостового переходу та підходів до нього, відносяться до категорії стічних та формують один випуск в р. Канелка. Згідно результатів досліджень, проведених інститутом „Укрдінпродор” якість води в стічних водах, що потрапляють в р. Канелка змінюється протягом року. Найбільша кількість забруднюючих речовин потрапляє в річку зі стічними водами навесні в період паводку внаслідок накопичення їх вздовж автомобільної дороги протягом зими (шкідливі викиди двигунів внутрішнього згоряння, протиожедна обробка покриття дороги сульфатами та хлоридами).

Очисні споруди, згідно проекту можуть працювати як в безнапірному режимі та і в напірному (під час весняних або дощових паводків), тому необхідно розрахувати їх на максимальні пропуски стічних вод, тобто для режиму водності 1% забезпечення. Максимальний рівень стічних вод, що потрапляють в р. Канелка може становити 121,2 м³ (з урахуванням різних типів покриття).

В якості розрахункової витрати води в річці Канелка прийнято $Q_{1\%} = 242,3 \text{ м}^3/\text{с}$, відповідно до якої побудовано гідрограф весняного паводку 1% забезпечення (рис.2.).



Розрахунок фонових концентрацій забруднюючих речовин в р. Канелка проводився шляхом співвіднесення отриманих концентрацій по кожному інгредієнту з витратами води у річці в цей період, для чого будувались графіки регресії $C = f(Q)$. З графіків визначалась не скоригована фонові концентрація забруднюючих речовин по витратах води у річці 1% забезпечення.

На рис. 3 представлено результати числових полів концентрацій свинцю, що попадають в р. Канелка зі зворотними стічними водами поблизу джерела викиду. Як показав аналіз результатів розрахунку, довжина струминної зони викиду змінюється в часі і досягає свого максимального значення через 6-7 хвилин після викиду, після чого струминна течія встановлюється і носить стаціонарний характер.

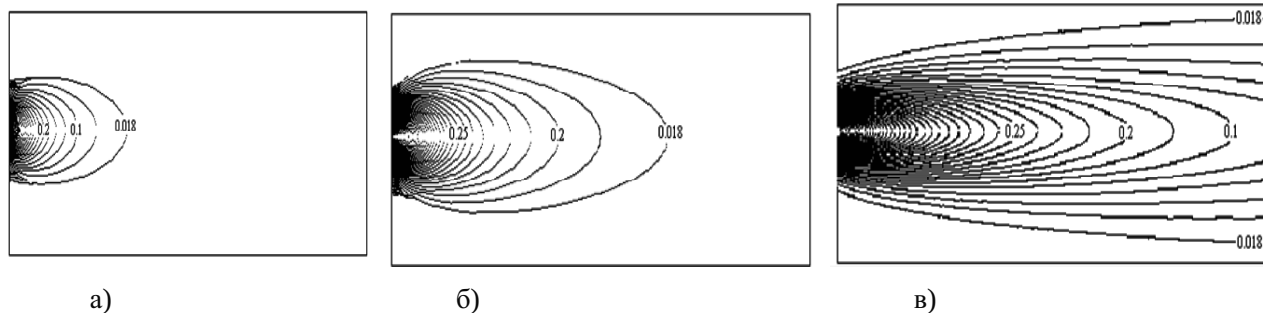


Рисунок 3 - Розподіл концентрацій свинцю в зоні випуску в р. Карелка:
а) $t=5$ с; б) $t=30$ с; в) $t=60$ с.

Аналіз натурних даних інституту «Укрдїпродор» та результатів числових експериментів на основі розробленого програмного комплексу, дозволив зробити висновок про залежність довжини ближньої зони викиду від параметра спутності $m = \bar{v}_{1,зовн} / \bar{v}_{1,0}$ і початкового густинного числа Фруда $Fr_0 = \bar{v}_{1,0} / \sqrt{g((\rho_{зовн} - \rho_0) / \rho_0) d_0}$. Графік даної залежності наведено на рис.4, де точки відповідають натурним даним інституту «Укрдїпродор», суцільні лінії одержані в результаті числового експерименту (натурні і числові експерименти проводились в діапазоні $Fr_0 = 1 \div 200$, $m < 1$, як найбільш типового для струминних викидів стічних вод у відкриті потоки). Як видно з рис.4 безрозмірна довжина ближньої зони викиду $L_{бл}^* = L_{бл} / d_0$ при $m < 1$ лінійно залежить від параметра спутності m і збільшується зі збільшенням числа Фруда Fr_0 .

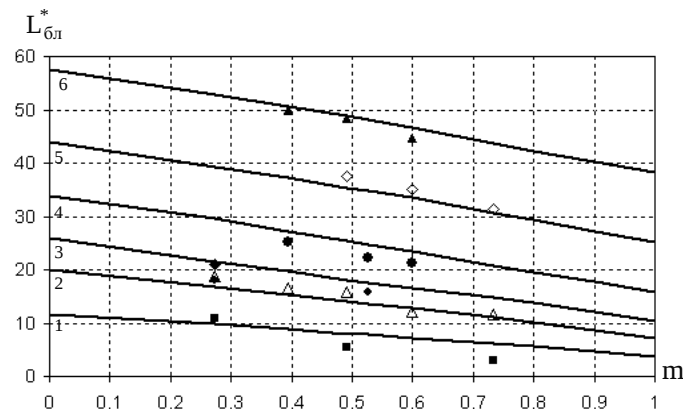


Рисунок 4 - Залежність безрозмірної довжини ближньої зони викиду від параметра спутності і початкового густинного числа Фруда:

1 – $Fr_0 = 1$; 2 – $Fr_0 = 54$; 3 – $Fr_0 = 65$; 4 – $Fr_0 = 92$; 5 – $Fr_0 = 121$; 6 – $Fr_0 = 200$

Висновки: Запропонована в роботі математична модель та програмний комплекс для ЕОМ дають можливість виконувати оцінку впливу об'єктів будівництва і реконструкції споруд дорожньо-транспортного комплексу на екологічний стан водних ресурсів, а також дозволяють прогнозувати наслідки різних аварійних ситуацій, пов'язаних з викидами домішок у природні водні потоки.

Література

1. Савенко В.Я., Славінська О.С., Бондаренко Л.П. Гідродинамічний опис розповсюдження забруднюючих речовин у ближній зоні від джерела викиду в безнапірному потоці // Вісник НТУУ «КПІ» – 2002.–Вип. 42, т.1. – С. 122–127.
2. Славінська О.С., Бондаренко Л.П. Математична модель переносу забруднюючих речовин поблизу джерела викиду у відкритих потоках з урахуванням анізотропії турбулентності // Вісник НТУУ „КПІ” .– 2002. – Вип.43. – С.181 – 183.
3. Gosman A.D., Spalding D.B. The Prediction of Confined Three-dimensional Boundary Layers // Safford Symposium on Internal Flows, London. – 1971. – P. 19.
4. Бондаренко Л.П. Розрахункові алгоритми динамічних і тепломасопереносних процесів в ближній зоні викиду забруднюючих речовин у відкритий потік // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. – 2003. – №12(58). – С.113-119.



ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ ВІДРИВНИХ ТЕЧІЙ ПРИ РОЗГАЛУЖЕННІ РУСЕЛ В ЗОНАХ ВПЛИВУ МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ З ГРУПОВИМИ ОТВОРАМИ

УДК 627.13:519.711.3

Славінська О. С., д.т.н., професор, НТУ
Козарчук І. А., аспірант, НТУ

Постановка проблеми. Одним з важливих питань при гідравлічних розрахунках мостових переходів є визначення розмірів групових отворів. Відділення рукавів від основного русла відбувається під впливом тих чи інших місцевих причин топографічного або геологічного характеру. Течія води в місцях розгалуження русел досліджується з метою вирішення завдань регульованої взаємодії потоків з об'єктами, що зводяться в річкових руслах, гідравлічних і руслових розрахунках при оцінці і прогнозах руслових деформацій.

Аналіз досліджень і публікацій. При русі річкового потоку виникають вторинні течії поперечної циркуляції двох видів: вторинні течії першого виду, обумовлені відцентровими силами на повороті русла [1], і вторинні течії другого виду, що виникають як у скривленому, так і в прямолінійному потоці, обумовлені нерівномірністю розподілу турбулентних напружень по живому перерізу русла, а саме нестійкістю основного осередненого руху потоку [2]. Сталі поперечні течії розвиваються в місцях значного скривлення струменів потоку і завжди мають характер замкнутих циркуляцій. Перший вид циркуляцій виникає не тільки на ділянках природних заокруглень потоку, а і у штучно стиснутих руслах, біля голови струмененапрямних дамб, а другий – при різномірній шорсткості і при різких змінах форми русла в поперечному перерізі.

Таким чином, **мета роботи** полягає в дослідженні процесу розвитку відривних течій при розгалуженні природних потоків в зонах впливу мостових переходів з груповими отворами.

У місці розгалуження вільна поверхня потоку виглядає сильно деформованою. На осі основного потоку дещо вище за верхове ребро відводу є западина вільної поверхні, за якою йде ділянка поступового підвищення рівня, що закінчується дещо нижче за низове ребро відвідного потоку. Це підвищення рівня обумовлене частковим відновленням потенційної енергії при розширенні потоку в основному руслі. Біля верхньої стінки бічного відводу є депресія рівня, яка набагато глибша, ніж в основному руслі. Вона повністю подібна до депресії рівня опуклого берега на початку вигину русла, тобто утворюється різкий поперечний похил вільної поверхні від зовнішнього до внутрішнього берега. Під дією цього поперечного похилу відбувається докорінна перебудова швидкісного поля потоку [3]. Біля низової стінки відвідного потоку рівень дещо підвищений в порівнянні з рівнем основного русла (рис. 1).

Потік, що входить у відвід (відвідний потік), зазнає сильного стиснення. При прямолінійних стінках основного русла і відведення біля верхньої стінки відвідного русла утворюється область вихороутворення. Якщо витрата, що відділяється, велика, то розширення потоку в основному руслі часто супроводжується утворенням другої зони завихрень біля стінки основного русла, протилежної до входу у відвідне русло (рис. 1) [3].

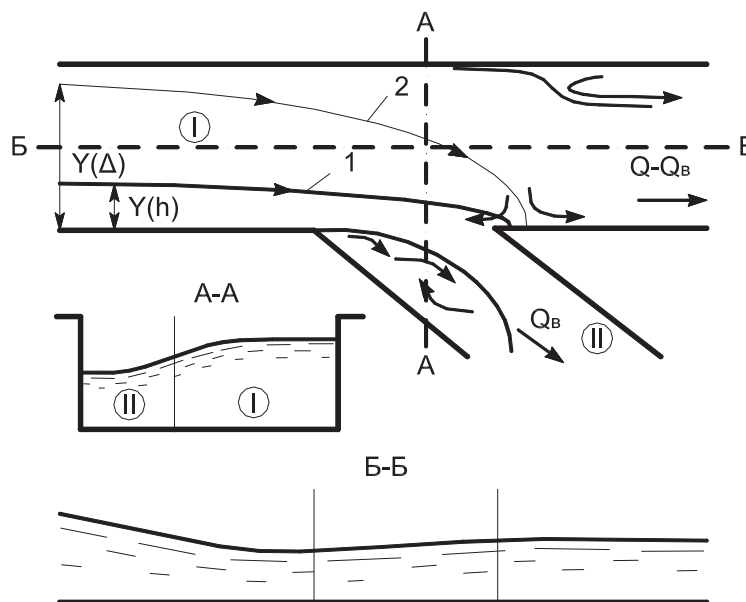


Рисунок 1. Схема поділу відкритого потоку



Внаслідок викривлення потоку, що відділяється, в ньому розвивається поперечна циркуляція, що відхиляє поверхневі струмені від входу у відповідне русло і направляє донні струмені у відвід. У результаті ширина захоплення донних струменів основного потоку виявляється значно більшою, ніж ширина захоплення поверхневих струменів. Цьому явищу також сприяє зростання донних швидкостей, що супроводжує стиснення потоку на початку поділу.

Асиметрія поперечного перерізу потоку на заокругленні потоку виникає внаслідок розвитку відривних течій, які здійснюють перенесення руслоформуючих наносів і таким чином призводять до значних деформацій русла [2, 3, 4, 5, 6].

Утворення значного похилу і поперечної циркуляції викликає значні зміни швидкісної структури потоку на заокругленні. Ґрунтуючись на законі збереження енергії, легко прийти до висновку, що в місцях, де рівень вільної поверхні зростає, швидкості повинні спадати, а в місцях зниження рівня вільної поверхні – зростати. Отже, перерозподіл швидкостей по вертикалі і по ширині потоку призводить до зміни всієї швидкісної структури.

Також при русі рідини в зонах водоверті зростає дисипація механічної енергії. Це відбувається внаслідок зміни гідравлічної структури потоку, збільшення нерівномірності розподілу швидкостей по живому перерізу, подовження шляху руху окремих часток завдяки гвинтовому характеру руху, посилення обміну кількістю руху між окремими струменями.

Отже, в результаті поділу потоків різко змінюється гідродинамічна структура і транспортуюча здатність потоків, яка проявляється в помітному викривленні планових струменів; утворенні значних (по відношенню до планових розмірів взаємодіючих потоків) рециркуляційних зон; появі суттєвих швидкостей вторинних течій поперечної циркуляції; трансформації епюр розподілу швидкостей як по глибині, так і по ширині потоку; наявності відривних течій аперіодичного характеру, що обумовлюють істотне підвищення пульсаційних складових швидкостей; зміні транспортуючої здатності потоків, що призводить до виникнення розмивів і відкладень біля берегів.

Як зазначалося вище, вторинні течії поперечної циркуляції першого виду виникають у штучно стиснутих руслах, якими, в тому числі, є річки зі спорудженими на них мостовими переходами. Мостовий перехід змінює структуру річкового потоку порівняно з побутовими умовами. Така заміна структури поширюється вниз і вгору від мосту на певну відстань, утворюючи собою певну ділянку – зону впливу мостового переходу. Це ділянка, в межах якої струмені потоку змінюють свої траєкторії (викривлюються) порівняно з побутовими умовами. Зона впливу складається із зони стиснення і зони розширення (розтікання) (рис. 2). Перерізи на початку зони стиснення і наприкінці зони розширення характеризуються тим, що лінії току в них приблизно паралельні.

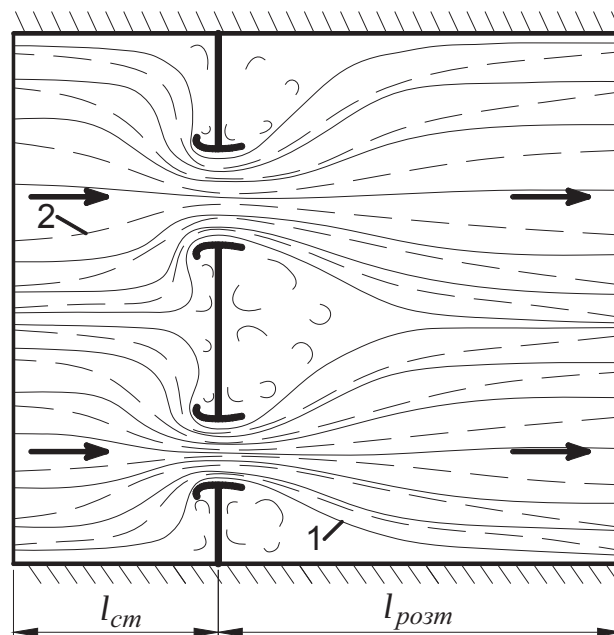


Рисунок 2. Схема течій в зоні впливу мостового переходу з груповими отворами: $l_{ст}$ – довжина зони стиснення; $l_{розт}$ – довжина зони розтікання; 1 – поверхневі течії; 2 – придонні течії.

Довжини зон стиснення і розтікання взагалі повинні визначатися при польових вишукуваннях під час паводків. Вони залежать від міри і форми стиснення, величини паводку і швидкості потоку.



Довжина зони розтікання визначається одним з наступних способів:

- на основі результатів моделювання в гідротехнічних лотках або за даними натурних спостережень на найближчих існуючих мостових переходах;
- за результатами теоретичної побудови планів течії на мостовому переході;
- за приблизною формулою.

В роботі Г. А. Федотова [7] наводиться така приблизна формула, згідно з якою довжина зони розтікання приймається вдвічі більшою за довжину зони стиснення. Довжина зони впливу мостового переходу прямо пропорційно залежить від різниці між шириною розливу річки під час паводку й отвором мосту і обернено пропорційно – від співвідношення ширини малої і великої заплав. Тобто зі збільшенням отвору мосту довжина зон стиснення і розширення зменшується.

Висновки. На мостових переходах з груповими отворами присутнє сполучення двох видів вторинних течій поперечної циркуляції. І відповідно дуже важливо правильно врахувати поєднання цих видів вторинних течій при визначенні групових отворів мостових переходів.

Складність розрахунку загального розмиву в зонах впливу мостових переходів з груповими отворами полягає в наступному:

- 1) наявність поперечної циркуляції за рахунок розгалуження потоків і різномірної шорсткості в руслі та на заплаві;
- 2) розгалуження потоків;
- 3) вплив мостового переходу;
- 4) неоднорідність потоків.

Список літератури:

1. Славінська О. С. Теорія та методи прогнозування розмивів в зоні впливу мостових переходів. Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.
2. Савенко В. Я., Славинская Е. С. Модель расчета внутренних течений. // Вестник НТУУ «КПИ». – Киев, 1999. Том 2, вып. 36. С.436 – 442.
3. Рутковская И. А. Двумерная математическая модель и метод расчета течения жидкости в узлах разветвления открытых потоков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. К: 2000.
4. Караушев А. В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
5. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. – Киев: Издат. АН УССР, 1957. – 188 с.
6. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков, – М.: Энергия, 1978. – 240 с.
7. Федотов Г. А. Изыскание и проектирование мостовых переходов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.



РЕКОМЕНДАЦИИ К РАЗРАБОТКЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ НОРМ СТОКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Многообразие климатических, почвенно-грунтовых и гидрологических условий различных регионов не позволяет применять трафаретных решений для определения расчетных расходов при проектировании водопропускных сооружений на автомобильных дорогах. Поэтому наиболее целесообразным подходом решения задач в этой области является создание региональных норм стока, которые учитывали бы особенности природно-климатических и гидрогеологических условий конкретного района. Как показывает практика, разработка и применение региональных норм стока может обеспечивать получение наиболее достоверных характеристик стока даже в самых малоизученных районах, позволяет решать задачи, выполнение которых по существующим традиционным методам затруднено или не предусмотрено.

Создание региональных норм стока следует начинать всегда с правильного выбора основной расчетной схемы, которая должна быть получена теоретически обоснованно. Только после выбора основной расчетной схемы можно учитывать входящие в формулы параметры, зависящие от региональных условий. Затем следует выполнять тщательное изучение физико-геологических, природно-климатических, гидрологических и метеорологических условий, а также проводить необходимые полевые обследования водостоков.

Факторы, определяющие величину расхода ливневого стока, можно разделить на две самостоятельные группы: региональные, зависящие от географических координат водосбора; геометрические, влияние которых одинаково для всех бассейнов, независимо от их местоположения.

Для правильного составления региональных норм стока необходимо, прежде всего, выделить по обоснованной схеме постоянно действующие для всех бассейнов факторы стока - геометрические характеристики бассейнов и по натурным показателям искать только региональные факторы, действительно зависящие от местоположения бассейна и учитывающие особенности местного климата и впитывающую способность почв.

Связь между средней интенсивностью ливня a и продолжительностью выпадения осадков t описывают обычно следующей зависимостью:

$$a = \frac{K}{t^{2/3}}, \quad (1)$$

где K - региональный климатический коэффициент.

Слой осадков за время хода ливня определяют по формуле:

$$h_0 = at = Kt^{1/3}. \quad (2)$$

Расчетное время дождя, наиболее опасное для проектируемых водопропускных сооружений принимается как «время добегания» воды от наиболее удаленной точки бассейна до замыкающего створа:

$$t = \frac{L}{v}, \quad (3)$$

где L - длина бассейна, км;

v - скорость стекания, м/с.

Величину расхода ливневого стока принято определять по зависимости:

$$Q = 16,7aF = 16,7\frac{KF}{t^{2/3}} = 16,7\frac{KFv^{2/3}}{L^{2/3}}, \quad (4)$$



где F - площадь водосбора, км².

Используя уравнение Шези и глубину слоя стекающей воды h , величину скорости добегания вычисляют по формуле:

$$v = mh^{2/3}I^{1/2}, \quad (5)$$

где m - показатель ровности склонов бассейна;

I - уклон бассейна, ‰.

На основе формул (2), (3) и (5) с учетом пропорциональности величин h и h_0 , после некоторых преобразований получим:

$$v^{2/3} \propto m^{6/11} K^{4/11} I^{3/11} L^{4/33} \quad (6)$$

Объединяя формулы (4) и (6)

$$Q \propto K^{15/11} \left(m^{6/11} \frac{FI^{3/11}}{L^{6/11}} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) величины в скобках объективно отображают влияние на расход Q геометрических характеристик бассейна, независимо от его географических координат. Множитель K , представляющий собой климатическую характеристику региона, объединен с постоянными коэффициентами пропорциональности, размерности и потерь, предполагаемыми в выражении (7), и заменен общим обозначением регионального коэффициента R .

Тогда, очевидно, региональный коэффициент учитывает и потери стока на впитывание, зависящие от характеристик почв региона.

$$Q = R \left(m^{6/11} \frac{FI^{3/11}}{L^{6/11}} \right). \quad (8)$$

Исходя из формулы (2), климатический коэффициент K выражается через слой осадков заданной продолжительности. Например, принимая $t = 60$ мин, получаем:

$$K = a_{\text{час}} t^{2/3} = (a_{\text{час}} t) \frac{1}{t^{1/3}} = \frac{h_{60}}{(60)^{1/3}} = \frac{h_{60}}{3,91}, \quad (9)$$

где $a_{\text{час}}$ - интенсивность ливня часовой продолжительности, мм/мин.

Потери стока на впитывание в почву можно учитывать как уменьшающим коэффициентом, так и вычитанием слоя потерь из слоя стока. Тогда с учетом потерь и с сохранением гиперболической связи в формуле (1) между интенсивностью водоотдачи и ее продолжительностью:

$$K = \frac{(h_{60})_e}{3,91}. \quad (10)$$

Обращают внимание на возможность уточнять региональные нормы стока, выделяя в рассматриваемом регионе бассейны с резко различающимися условиями впитывания в почву. Рекомендуют вводить в расчет «относительный коэффициент стока» - ϕ_0 , показывающий сравнительную впитывающую способность почв бассейна. С помощью этого коэффициента можно объединять данные о натурных расходах воды, сформировавшихся на бассейнах с различными почвами, приводя их к одному виду почв. Величины этих относительных коэффициентов целесообразно определять по известным таблицам обычных



коэффициентов стока, взяв один из видов почв за исходный и приняв для него $\varphi_0 = 1$. Несмотря на условность такого расчета, этот прием дает возможность уточнять региональные нормы стока для любого района, а в ряде случаев позволяет объяснить отклонения расчетных величин от натурных данных.

В итоге предлагаются следующие, наиболее полные и ясно выводимые региональные зависимости:

$$Q = R\varphi_0 \left(m^{6/11} \frac{FI^{3/11}}{L^{6/11}} \right), \quad (11)$$

$$Q = R\varphi_0 \left(m^{1/2} \frac{FI^{1/4}}{L^{1/2}} \right) \quad (12)$$

или после некоторого упрощения:

$$Q = R\varphi_0 (m^{1/2} F^{3/4} I^{1/4}), \quad (13)$$

приняв $L = F^{1/2}$ и вводя среднюю ширину бассейна $B = F/L$

$$Q = R\varphi_0 (\sqrt{mFI}^{1/4}), \quad (14)$$

где R - региональный коэффициент той же вероятности превышения, что и расход Q ;

φ_0 - относительный коэффициент стока;

m - показатель ровности склонов бассейна;

F - площадь бассейна, км²;

L - длина бассейна, км;

B - средняя ширина бассейна, км;

I - уклон бассейна, ‰.

Таким образом, для отыскания региональных коэффициентов (постоянных для конкретного района или плавно меняющихся по его территории) необходимо натурные данные о расходах делить на функции геометрических характеристик соответствующих бассейнов, т.е.

$$R = \frac{Q}{\varphi_0 f(m, F, L, I)}. \quad (15)$$

Несмотря на теоретически обоснованную схему и соответствующий вывод для составления региональных норм стока, в связи с приближенностью входящих в формулы (11-15) компонентов и упрощенностью закономерностей формирования и стекания нестационарных ливневых вод по склонам водосбора, необходима соответствующая корректировка по натурным данным о расходах, чтобы региональный параметр приобретал более устойчивый характер.

Для поиска и сбора необходимых натурных сведений предварительно на планах вдоль трассы проводят генеральный водораздел, от которого идет сток к принятым во внимание искусственным сооружениям. Это снижает ошибки определения верхних границ отдельных площадей водосбора.

Зная положение главного водосбора, по картам следует уточнить границы всех водосборов, их площади и разветвленность. Для этой цели от каждого сооружения нужно проходить по дну лога с необходимыми геодезическими приборами до водораздела и составлять продольный профиль лога. Обычно за линию водораздела геодезический ход продолжают на 10 % его длины при неровном рельефе и не менее 20 % - при плоском. Необходимо твердо убедиться в том, что принятый главный лог есть истинный. При разветвленных бассейнах необходимо пройти по главным разветвлениям, чтобы установить их боковые границы и убедиться, что второй лог не длиннее первого. За главный принимают наиболее длинный лог. По полученным точкам водоразделов всех логов уточняют на карте главный водораздел вдоль трассы и одновременно устанавливают границы между отдельными логами. Таким образом, получают план бассейнов и логов, привязанный к трассе, наглядно характеризующий общую топографическую ситуацию района.



Уклоны склонов и логов определяют по планам в горизонталях или непосредственными измерениями с помощью геодезических приборов. Поскольку уклоны на одном и том же склоне не одинаковы, для оценки скорости стекания слоя стока к ближайшему логу необходимо вычислить их средневзвешенные значения.

Одним из решающих факторов, влияющих на сток, является впитывание выпавших осадков в почву. Для выяснения состава и структуры почвы и отнесения ее к определенной категории рекомендуют на бассейне делать шурфы глубиной до 0,5 м, так как для оценки впитывания ливневых дождей решающее значение имеют только верхние 20 - 30 см почвы. Количество шурфов назначают по таблице 1.

Таблица 1

Количество шурфов, необходимое для определения категории почвы

Обследования	Число шурфов на 1 км ² водосбора	Всего не менее	Всего не более
	средняя норма		
Предварительные на каждом варианте	0,5	1	3
Окончательные на принятом к строительству варианте	1	2	10

По результатам разработки шурфов квалифицированно определяют категорию почв по впитыванию на водосборе. Водосборы площадью более 10 км² целесообразно делить на несколько частей, если разница в категории почв оказывается значительной.

Оценка достоверности полученных данных осуществляется компетентно с соответствующей ответственностью. При сборе и визуальном осмотре необходимо установить:

- следы и отметки наблюдаемых уровней в логах, на опорах моста, у входов существующих водопропускных сооружений и т.д.;
- какие паводки более опасны для данного сооружения: от ливней или от снеготаяния;
- факты перелива воды через насыпь, величины слоя перелившейся воды и размыва земляного полотна, характерные повреждения сооружений от прохода воды;
- повторяемость паводков разной величины в данном месте.

Если во время изысканий пойдет сильный дождь, то следует измерить количество выпавших осадков, обратив особое внимание на количество осадков во время прохода наиболее интенсивного ливня. Зная количество осадков и время, можно определить вероятность превышения паводка.

Обследование следов прошедших паводков может косвенно помочь определению расчетных расходов и объемов стока с определенной вероятностью превышения. Однако следует отметить, что обычно повторяемость в натуре расходов, зафиксированных наблюдениями и прошедших через сооружение, установить довольно сложно. Величины расходов и объемов, определенные приближенно, а не гидрометрически, могут иметь значительные отклонения от действительных. Применяемые гидравлические формулы определяют расход, проходящий лишь через сооружение, т.е. искаженный аккумуляцией. Если перед сооружением аккумуляровалась вода, то фактический расход, притекавший с водосбора, может оказаться в зависимости от пологости бассейна значительно больше. Необходимо также учесть, что при любой вероятности превышения может быть любое количество равновероятных сочетаний интенсивности и продолжительности водоотдачи.

Очевидно, что при учете аккумуляции ливневых вод перед сооружениями необходимо определить не только расход, но и объем стока. В этой связи целесообразна разработка карты ливневого районирования и составление таблиц интенсивности ливня часовой продолжительности при различных вероятностях превышения. На основе обработки натурных данных принято разрабатывать карты изолиний интенсивностей часовой продолжительности, суточных и годовых максимальных слоев осадков и т.д. для различных вероятностей превышения.

Литература

1. ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования.
2. ГОСТ Р 52399-2005. Геометрические элементы автомобильных дорог.
3. Проектирование автомобильных дорог: Справочник инж.-дор. / Под ред. д-ра техн. наук П.А. Федотова / М.: Транспорт, 1989. - 438 с.
4. Андреев О.В. Справочник инженера-дорожника. Изыскания и проектирование автомобильных дорог.- Изд.3, перераб. и доп. 1977.



К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РИСКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИСТЕМЫ ВОДООТВОДА НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В основных положениях концепции устойчивого развития Украины, разработанных ведущими учеными НАН Украины [1] отмечается, что «основой устойчивого развития является паритетность отношений в триаде «человек – транспортные системы – окружающая среда». Стратегия устойчивого развития общества предполагает оценку безопасности автомобильных дорог с целью предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций и минимизации вреда для окружающей природной среды и человека в случае их возникновения. Одним из основных аспектов оценки воздействия системы водоотвода на автомобильных дорогах на окружающую среду является оценка комплексных мероприятий по обеспечению нормативного состояния окружающей среды и ее безопасности. Поэтому стратегия оценки воздействий на окружающую среду (ОВОС) имеет приоритетное влияние на формирование индикаторов устойчивого развития, которыми являются количественные показатели оценки воздействий системы водоотвода на автомобильных дорогах на окружающую среду, а также разработку методов управления техногенной безопасностью.

Принятие решений на основе оценки влияния системы водоотвода на автомобильных дорогах на окружающую среду.

Комплекс проектных решений помимо ресурсосберегающих, защитных, восстановительных и компенсационных мероприятий должен содержать определение степени экологического риска планируемой деятельности и воздействий на условия жизнедеятельности человека, а количественные и качественные показатели оценки уровней экологической безопасности для жизнедеятельности населения планируемой деятельности являются обязательными для заявления об экологических последствиях деятельности.

Целью работы является разработка алгоритма принятия решения о приемлемости проектов системы водоотвода на автомобильных дорогах на основе количественных оценок, в частности, формирование методологии определения рисков в системе ОВОС.

При системном подходе необходимо говорить о формировании завершеного алгоритма осуществления оценки воздействия системы водоотвода на автомобильных дорогах на окружающую среду с включением конкретных показателей и механизмов управления безопасностью уже на стадии проектирования системы водоотвода на автомобильных дорогах. На смену концепции «нулевого риска» пришла так называемая концепция «приемлемого риска», в основе которой заложен принцип «предвидеть и предупредить» – принцип приемлемого риска ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Эта концепция предусматривает возможность чрезвычайных ситуаций на автомобильных дорогах и соответственно меры по предотвращению ее возникновения и развития [3].

Следует, во-первых, сформулировать определением каких рисков должен завершаться ОВОС и установить границу приемлемых значений риска, во-вторых, выработать строгие критерии принятия решений о приемлемости проекта, в-третьих структурировать требования к содержанию ОВОС в соответствии со спецификой «техногенной опасности» системы водоотвода на автомобильных дорогах.

Следует отметить, что концепция ОВОС прежде всего предопределяет оценку наносимого ущерба, а следовательно и должна завершаться определением рисков, которые количественно позволяют оценить его: экологический, техногенный, индивидуальный, социальный, экономический. Риск экологический рассматривается как вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

Основные составляющие экологического риска определяются прямым (загрязнение атмосферы, источников и водоемов, разрушение почвенного покрова и т.д.) и косвенным ущербом (нарушение климатического баланса, ухудшение качественных характеристик природных ресурсов и т.д.) [3]. Техногенный риск связан с опасностями, исходящими от технических объектов (автомобильный транспорт) [4]. Иногда под техногенным риском понимают риск технический (вероятность отказа (ДТП) с последствиями определенного уровня, который произойдет за некоторый отрезок времени). Социальный риск характеризует масштаб и вероятность (частоту) возможных чрезвычайных ситуаций на автомобильных дорогах и определяется функцией распределения потерь (ущерба) (F/N-кривая или кривая Фармера).

Индивидуальный риск — вероятность (или частота) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности при реализации неблагоприятного случайного события.

Экономический риск может рассматриваться как экономический эквивалент социального ущерба [3] или как экономический ущерб (потеря материальных ценностей) [4].

По уровню опасности различают [4]: неприемлемый – уровень риска $> 10^{-6}$; приемлемый – $10^{-6} \leq$ уровень риска $\leq 10^{-8}$; безусловно приемлемый – уровень риска $< 10^{-8}$. Поскольку естественными границами риска для человека является диапазон между 10^{-2} (вероятность ДТП на душу населения) и 10^{-6} (нижний уровень риска от природной катастрофы на автомобильной дороге или др), техногенный риск считается приемлемым, если он меньше 10^{-6} . Риск определяется статистическим либо вероятностным методом.

Этапы определения экологического риска при оценке воздействий системы водоотвода на автомобильных дорогах на окружающую среду

Возникает вопрос о формировании алгоритма определения экологического риска при выполнении ОВОС на уровне приемлемого. И здесь можно ожидать скорее отсутствие, чем наличие статистических данных.

С учетом разработанных методик и условий минимальной необходимости можно предложить следующую последовательность системы количественных оценок для принятия решения о приемлемости проекта и управлением безопасностью как завершающую стадию ОВОС (Рис.1):

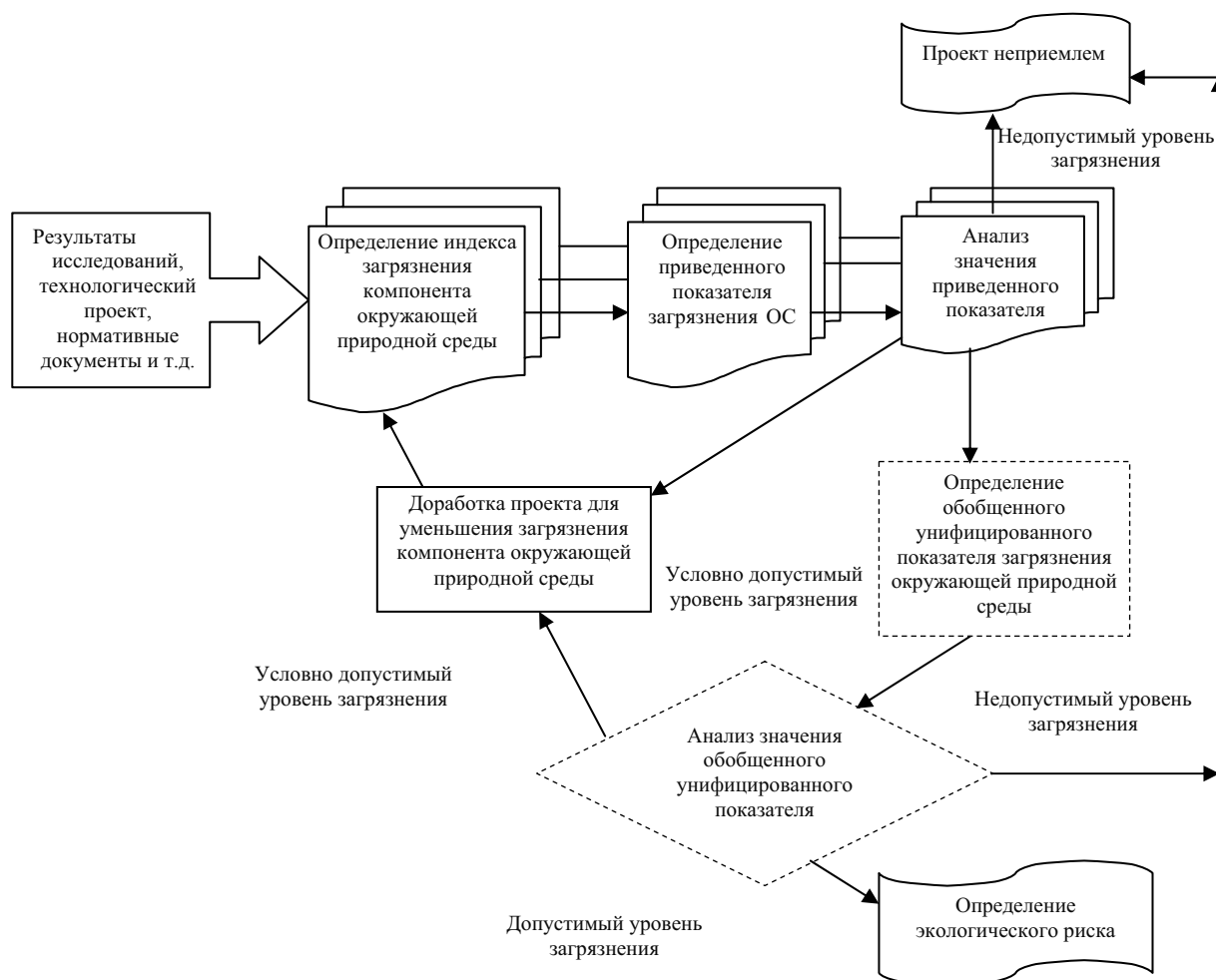


Рисунок 1 – Принципиальная схема формирования системы количественных оценок при выполнении ОВОС

На основе исследований технологического проекта в соответствии с действующими нормативными документами, рассчитывается индекс загрязнения компонента окружающей среды (ОС) (атмосферы, гидросферы, почвы и т.д.) [4], в общем случае представляемый зависимостью (1):

$$P_j = F_j \frac{P_{\phi_i}}{P_{n_i}} \quad (1)$$

где P_j значение индекса загрязнения j -го компонента окружающей природной среды, который определяется как функция F_j (чаще как аддитивная) отношения фактического значения P_{ϕ_i} показателя i -го загрязняющего ингредиента (например, фактическое содержание оксида углерода в атмосфере) к нормативному значению P_{n_i} предельно допустимой концентрации).

Значение индекса загрязнения компонента окружающей среды приводится к приведенному показателю загрязнения (этот этап обусловлен «разномерностью» индексов и их зависимостью от методики расчета).

Для получения приведенного индекса возможно использование функции желательности [5, 6] На основании функции желательности рассчитаны значения приведенного показателя загрязнения компонента окружающей среды по формуле (2):

$$P_j F_j = 1 - h_j, \quad (2)$$

где h_j - функция желательности для j -го индекса загрязнения окружающей природной среды. В расчетах функции желательности использовалась следующая зависимость:

$$h_j = e^{-x_j}, \quad (3)$$

где x_j - некоторая безразмерная величина, которая связана с (1) и определяется по формуле (4):

$$x_j = \frac{2P_j - \left[\max \frac{P_{\phi_i}}{P_{n_i}} + \min \frac{P_{\phi_i}}{P_{n_i}} \right]}{\left[\max \frac{P_{\phi_i}}{P_{n_i}} - \min \frac{P_{\phi_i}}{P_{n_i}} \right]}, \quad (4)$$

На основе полученного значения принимается решение о приемлемости проектного решения по данному компоненту ОС, его доработке (например, усовершенствованию системы очистки сточных вод и т.д.) или отклонении данного проекта [6].

При условии приемлемости проекта для каждого компонента ОС формируется унифицированный показатель оценки влияния на окружающую среду, при допустимом значении которого определяется значение экологического риска для данного проекта.

При допустимом значении экологического риска проводится идентификация потенциально опасных объектов, особенно для выявления источников опасности.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема формирования значений рисков при выполнении ОВОС.

В соответствии с методикой идентификации потенциально опасных объектов, «опасность - совокупность факторов, связанных с функционированием системы водоотводов на автомобильных дорогах, которые возникают вследствие определенных иницирующих событий и способных оказывать негативное влияние на окружающую среду». Идентификация предполагает анализ системы водоотводов на автомобильных дорогах и характера функционирования для выявления источников опасности, а также определения уровней возможных чрезвычайных ситуаций.

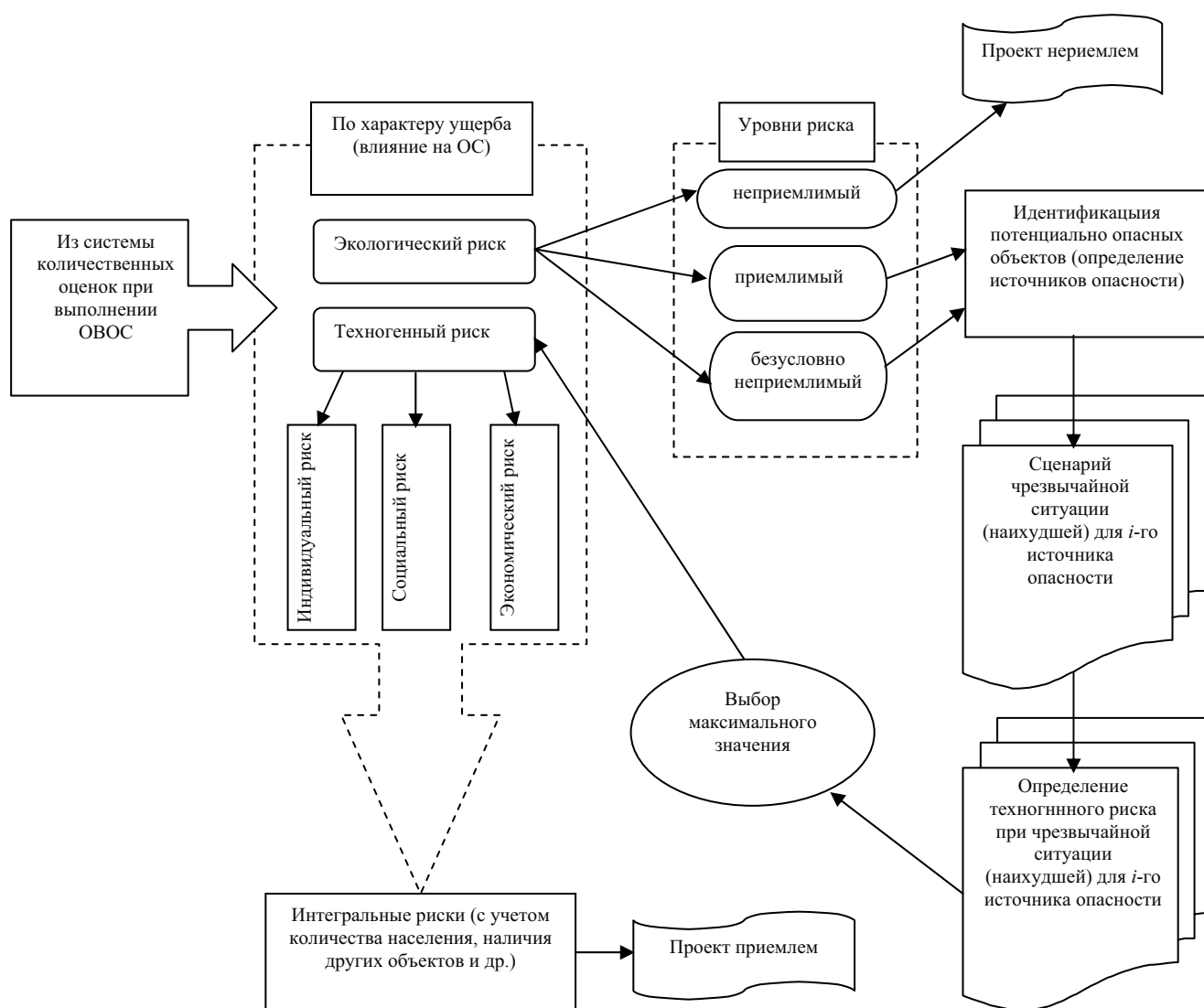


Рисунок 2 – Принципиальная схема формирования значений рисков при выполнении ОВОС

Для выявленных источников опасности (возможно с учетом имеющихся данных о чрезвычайных ситуациях на автомобильных дорогах) определяется техногенный риск, также социальный, экономический и индивидуальный (добровольный и принудительный).

На завершающем этапе определяются интегральные риски, которые должны учитывать специфику региона (например, количество проживающих людей, присутствие других объектов придорожной зоны автомобильной дороги).

Так, для определения техногенного риска может быть предложен типовой сценарий аварии (чрезвычайной ситуации на автомобильной дороге) [7], который представлен на рис. 3.

Такой подход не противоречит действующим методикам, т.к. предполагает последовательное определение потенциально опасных факторов (источник опасности), возможных опасных ситуаций (возможные чрезвычайные ситуации).

Под опасным фактором понимается выход параметров системы водоотвода на автомобильных дорогах за допустимые пределы, приводящие к возможности возникновения чрезвычайных ситуаций. Под чрезвычайной ситуацией понимается состояние оборудования, узла, блока или установки, при котором имеется потенциальная возможность возникновения чрезвычайной обстановки на автомобильной дороге: разрушение оборудования, утечки или выброс веществ и т.п.



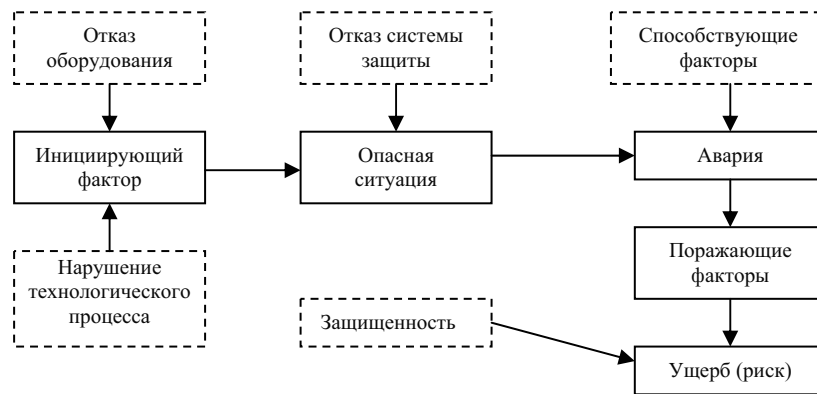


Рисунок 3 – Типовой сценарий развития чрезвычайной ситуации на автомобильной дороге

Для каждой чрезвычайной ситуации необходимо определить перечень факторов, которые способствуют или препятствуют началу чрезвычайной ситуации на автомобильной дороге и определить поражающие факторы, возникающие при возникновении аварии при определенных способствующих факторах (определение уровня чрезвычайной ситуации).

Литература

1. <http://www.undpsust.kiev.ua/ConcSD-u.htm>
2. ДБН А2.2.-1-2003 «Состав и содержание материалов оценки воздействий на окружающую среду (ОВОС) при проектировании и строительстве предприятий, зданий и сооружений»
3. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: Анализ и оценка.-М.:ИКЦ «Академкнига»,2006.- 118с.
4. Экологическое аудирование управления рисками: Учебное пособие/ Л.М. Хурнова, Д.Х. Мамина. - Пенза: ПГАСА, 2003. - 100 с.
5. Статюха Г.А., Абрамов И.Б., Бойко Т.В., Ищишина А.А. К вопросу количественной оценки загрязнения атмосферного воздуха в системе ОВОС //Восточно-европейский журнал передовых технологий. Технология неорганических и органических веществ и экология,2008, №1/3(31), С.36-39.
6. Статюха Г.О., Бойко Т.В., Бендюг В.І., Абрамов І.Б. Алгоритм прийняття рішень при оцінці впливів на навколишнє середовище //Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вінниця, 2006, №5, С.119-123.
7. Ибадулаев В.А., Степанов И.В., Турусов С.Н. Принятие решений по управлению готовностью сложных систем //Всерос. научно-практической конф. «Актуальные проблемы защиты и безопасности - 2002»: Сб. трудов, г. Санкт-Петербург, 9-11 апреля 2002 г., –СПб., 2002.



УДК 625.72

Є.Б. Угненко, д-р техн. наук, І.М. Матлахов, ст.. викладач, О.Д. Пупченко, аспірант

ІСНУЮЧІ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ВОДОВІДВОДУ ТА ДРЕНАЖУ НА АЕРОДРОМАХ

Використання водовідведення і дренажу дозволяє виключити перезволоження ґрунтів в основі покриттів і поверхневих шарів льотного поля поверхневими і ґрунтовими водами, підвищити міцність, стійкість і довговічність аеродромних покриттів, а також скоротити нельотні періоди часу і поліпшити умови експлуатації ґрунтових льотних смуг.

Завданнями проєктованих заходів по водовідведенню і дренажу є:

захист території аеродрому і ділянок штучних покриттів від затоплення зливовими і талими водами, що стікають з суміжних водозборів.

поліпшення стоку, збір поверхневих вод із замкнутих понижень і інших перезволжених місць, а також вод, що стікають з покриттів і прилеглих до них ґрунтових водозборів;

пониження рівня ґрунтових вод під штучними покриттями і на окремих ґрунтових ділянках за наявності їх високого рівня;

перехоплення ґрунтово-напірних вод, що поступають до злітно-посадкової смуги з території, що примикає до аеродрому;

збір і відведення надмірної води з дренуючих і ґрунтових підстав штучних покриттів.

Водовідвідні і дренажні системи аеродромів повинні проєктуватись з урахуванням наступних основних принципів:

забезпечення безпеки виконання злітно-посадкових операцій літаків, що досягається правильним розташуванням водовідвідних і дренажних систем в плані і необхідною міцністю їх конструкції;

забезпечення економічності проєктованих заходів, що досягається введенням найбільш дешевих і ефективних заходів по водовідведенню і дренажу території аеродрому;

використанням збірних конструкцій з елементів заводського виготовлення;

проєктуванням водовідвідної і дренажної системи найменшої протяжності, з мінімальним перетином аеродромних покриттів;

забезпечення можливості перспективного розвитку аеродрому без істотного перевлаштування водовідвідної і дренажної мережі.

Перехоплення і відведення поверхневих вод, що поступають до аеродрому із зовнішніх водозборів, здійснюється за допомогою нагірних каналів, розташованих за межами льотного поля.[1]

Розрахунковий рівень високої води (РРВВ) при необхідності захисту аеродрому від затоплення паводковими водами слід приймати з вірогідністю перевищення 1:100 для аеродромів класів А, Б та 1:50 для аеродромів інших класів.

Для попередження перезволоження ґрунтів поверхневою і ґрунтовою водою повинна проєктуватись відповідна водостічно-дренажна система.

Для видалення поверхневих вод із замкнутих понижень повинні влаштовуватись тальвежні колодязі з випуском води в колектори, що відводять воду за межі аеродрому.[2]

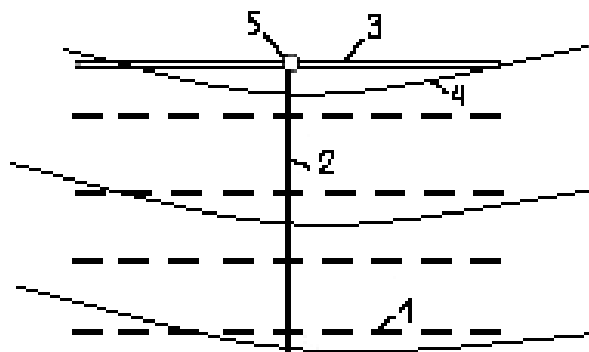


Рис. 1 Схема поверхневого дренажу ґрунтової ділянки аеродрому :

1 - осушувач; 2 - збирач; 3 - колектор; 4 - горизонталь;
5 - оглядовий колодязь



На окремих ділянках з ухилом поверхні, що не забезпечує сток (менше 0,005), в зонах надмірного, а також змінного зволоження за наявності слабопроникних (глинистих, пилуватих) ґрунтів, на яких збір поверхневої води іншими пристроями, наприклад тальвежними колодязями, неможливий, може бути влаштовано поверхневий дренаж, що складається з осушувачів, збирачів і колекторів (рис.1).

Для пониження рівня ґрунтових вод повинно передбачати облаштування глибинного дренажу (рис. 2). Дрени при цьому необхідно розташовувати паралельно гідроізогіпсам.[3] Водовідвідні і дренажні системи аеродромних покриттів повинні проектуватись відповідно до пп. 6.1 - 6.30 глав СНиП "Аеродроми". Норми проектування".

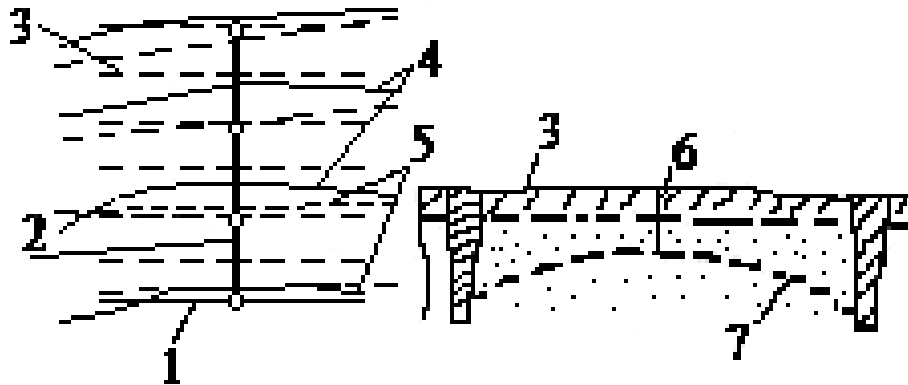
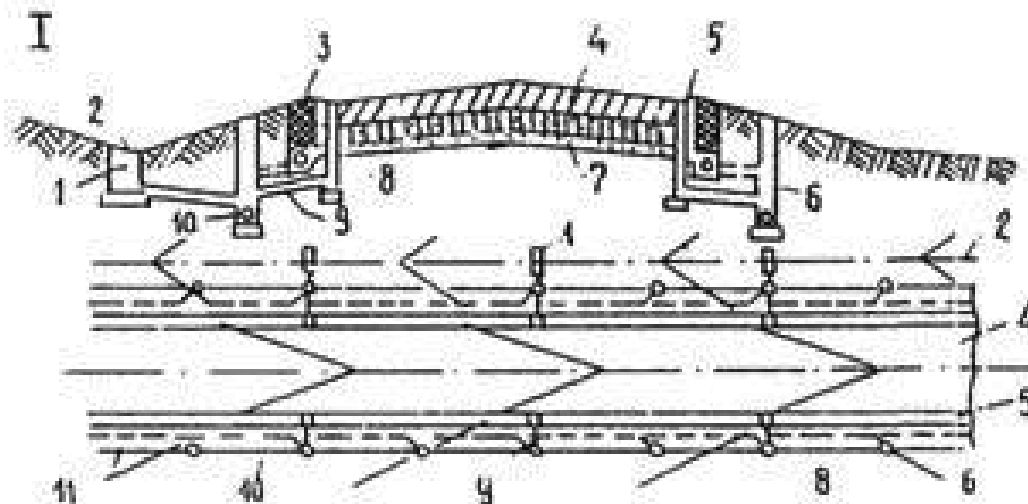


Рис.2 Схема облаштування глибинного дренажу льотного поля
1 - колектор; 2 - збирач; 3 - дрена; 4 - горизонталь; 5 - гідроізогіпси; 6 - норма осушення; 7 - депресивна крива

Водостічні та дренажні системи проектуються по одній з трьох принципових схем водовідведення і дренажу злітно-посадкових смуг (ЗПП) з штучним покриттям, руліжних доріжок (РД), перонів і спецмайданчиків з штучними покриттями (рис. 3).



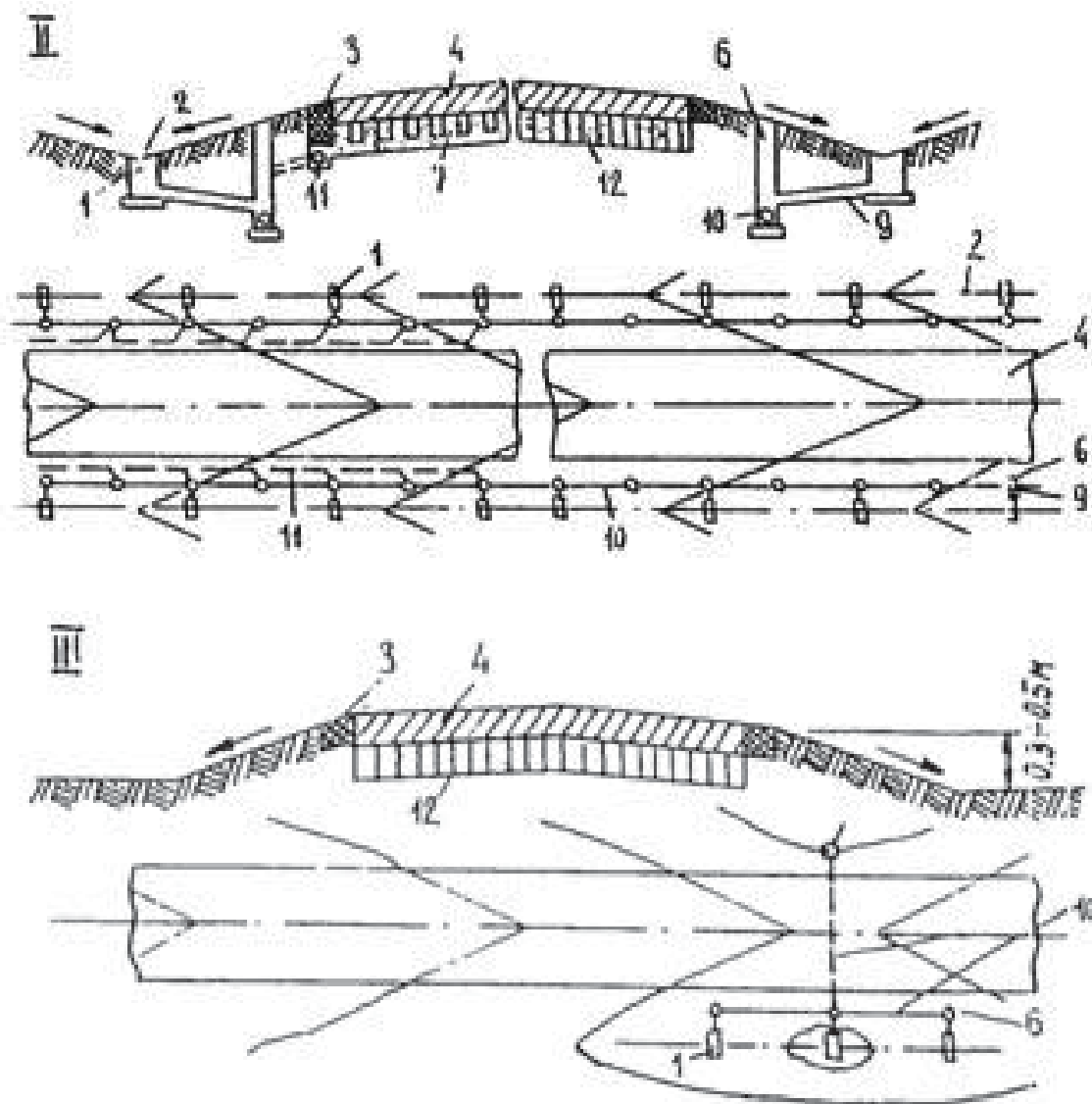


Рис. 3 Схеми водовідвідних і дренажних систем (профіль і план) аеродромних покриттів

1 - тальвежний колодязь; 2 - ґрунтовий лоток; 3 - відмостка; 4 - покриття;
5 - лоток в кромці покриття; 6 - оглядовий колодязь; 7 - основа з дренуючим шаром; 8 - дощоприймальний колодязь; 9 – перепускна труба; 10 - колектор; 11 - закромочний дренаж; 12 - основа без дренуючого шару

Водовідведення і дренаж по I схемі проектується для аеродромів в зонах надмірного і змінного зволоження при ширині схилу покриття > 30 м і наявності глинистих і пилуватих ґрунтів, схильних до перезволоження. По II схемі поверхнева вода, що стікає з покриттів, скидається на ґрунтові узбіччя і по ним в ґрунтові лотки.[3]

Водовідведення і дренаж по II схемі проектується для аеродромів в зонах надмірного, змінного зволоження, а у разі глинистих і суглинних ґрунтів в зоні недостатнього зволоження. Крім того, II схема застосовується також при облаштуванні збірних покриттів, у тому числі в умовах, для яких зазвичай рекомендується застосовувати I схему.[1]

По III схемі водовідвідні заходи у вигляді ґрунтових лотків і колекторів передбачаються лише вибірково. Закромочні дрени не влаштовуються. Водовідведення по III схемі проектується для аеродромів в посушливій зоні і зоні недостатнього зволоження при I типі місцевості, а також в інших кліматичних зонах за наявності добре дренуючих ґрунтів (пісок, піщано-гравійна суміш) і відсутності умов їх розмиву.

Для зниження діаметру труб головних колекторів, особливо колекторів великої протяжності, може передбачатись облаштування регулюючих басейнів, що призначені для збору надлишку зливого стоку (рис. 4).



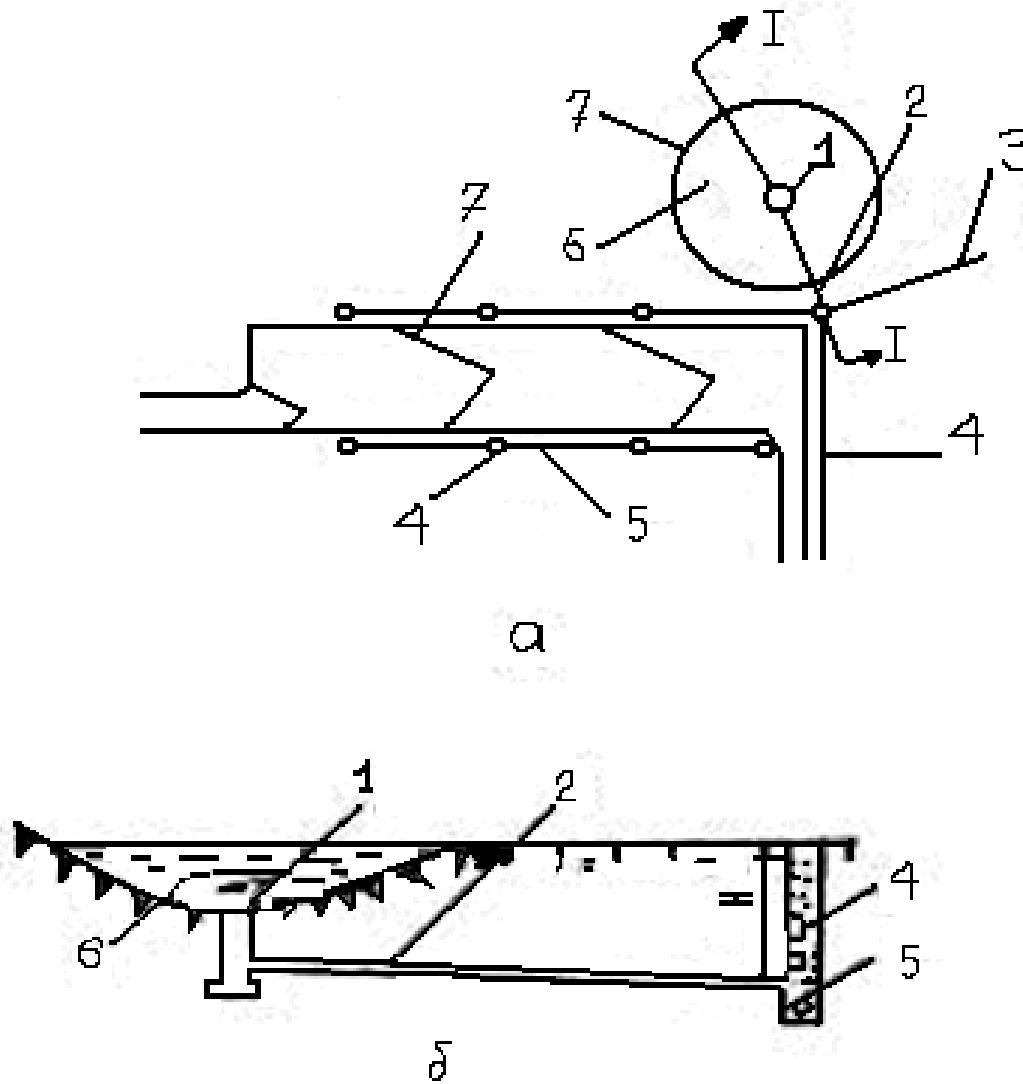


Рис. 4 Схема облаштування регулюючого басейну на аеродромі

а - план; б - розріз по I - I;

1 - тальвежний колодязь; 2 – перепускна труба; 3 - головний колектор; 4 - колектор; 5 - оглядовий колодязь; 6 - регулюючий басейн; 7 - горизонталь

Наповнення і спорожнення басейну здійснюється через перепускна трубу 2 (рис. 4), що має ухил у бік колекторів. Наповнення басейну відбувається при напорному режимі роботи колектора 3.

Водостоки з ділянок штучних аеродромних покриттів, стічні води з яких можуть мати неприпустиму концентрацію забруднень можуть проектуватись у вигляді самостійної водовідвідної лінії з подачею стічної води у відповідні очисні споруди.

Література

1. Экология и экономика природопользования: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям / Под ред. Э.В. Гирусова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 591 с.
2. Глушков Г.И. Изыскания и проектирование аэродромов Издательство: «Транспорт», Москва Год: 1992
3. Блохин В.И., Белинский И.А., Циприанович И.В., Гелетука Г.Н. Аэропорты и воздушные трассы Издательство: М.: Транспорт Год: 1976.



УДК 625.7/8

Усиченко О.Ю., к.т.н.

ПРОБЛЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПІДТОПЛЮВАНИХ НАСИПІВ

Анотація. В статті проаналізовано положення сучасних нормативних документів України щодо методів розрахунку стійкості укосів насипів, що періодично або постійно підтоплюються та вимог до встановлення розрахункових характеристик ґрунтів, що застосовуються в таких насипах.

Ключові слова. Підтоплення, насипи автомобільних доріг, заплава, армовані ґрунти, нормативне забезпечення.

Аннотация. В статье проанализированы положения современных нормативных документов в Украине, касающихся методов расчета устойчивости насыпей, которые периодически, либо постоянно подтапливаются, и требований к установлению расчетных характеристик грунтов, используемых в таких насыпях.

Ключевые слова. Подтопление, насыпи автомобильных дорог, пойма, армированные грунты, нормативное обеспечение.

Summary. The article analyzes the current situation in Ukraine with normative documents relating to calculating methods of the embankments stability, which are periodically or continuously flooding, and requirements to establish a settlement soil parameters used in the embankments.

Keywords. Flood, road embankments, reinforced soils, regulatory support.

Постановка проблеми. Ґрунти річкових долин займають в нашій країні близько 2,6 території. Більшість рівнинних річок (великих та малих) мають розвинені долини. Заплава — це частина дна річкової долини, що лежить вище меженного рівня води в річці і періодично затоплюється під час повені. Ділянки заплав поділяються на три області – прируслову, центральну на притерасну. Вони відрізняються за слідом річкових наносів, гідрологічному режиму, рослинності та ґрунтам. Тривалість затоплення у заплаві може тривати від декількох днів до місяця і більше. В прирусловій частині заплави відкладаються, переважно, крупні піщані частинки, в той час як центральна частина заплави складена, переважно, піщаними та глинистими ґрунтами. Притерасна частина пойми, як правило, є перезволоженою і заболоченою, де формуються болотні ґрунти. Для будівництва найкраще вибирати рівні ділянки річкової долини, що не розмиваються і не підтоплюються. Але за умовами прокладення траси автомобільної дороги, особливо на підходах до мостових переходів є необхідність у розміщенні земляного полотна також і на заплавах. Основа насипу в таких випадках складена слабкими болотними або глинистими ґрунтами, є небезпека підтоплення укосів насипу під час проходження паводка та під час інтенсивних опадів влітку та восени.

Діючими нормативними документами в Україні (ДБН В.2.3-4-2007 та ВБН В.2.3-218-171-2002) встановлено лише загальні вимоги щодо необхідності врахування умов підтоплення при проектуванні та будівництві земляного полотна на заплавах ділянках: п.6.4.7 [1] «При слабких основах, використанні зв'язних ґрунтів підвищеної вологості, а також для підтоплених насипів крутизну укосів призначають на основі розрахунків»; п.6.6.9 [1] «Насип на затоплюваних заплавах ділянках, при перетині водойм і на підходах до мостових споруд необхідно проектувати з урахуванням дії хвиль, гідростатичної та ерозійної дії води в період підтоплення»; п.7.3. [1] «Висоту насипів і огорожувальних дамб біля середніх та великих мостів і на підходах до них, а також насипів на заплавах слід призначати з таким розрахунком, щоб брівка земляного полотна підвищувалась не менше ніж на 0,5 м, а брівка незатоплених регуляційних споруд і бERM – не менше ніж на 0,25 м над розрахунковим горизонтом води з урахуванням підпору і висоти набігання хвилі на укіс»; п.7.6 [1] «Підтоплені укоси насипів необхідно захищати від руйнівних дій хвилі відповідними типами укріплень залежно від гідрологічного режиму ріки або водоймища»; п. 1.2.9 [4] «При спорудженні земляного полотна дороги, регуляційних гребель і траверсів в межах річкових заплав і в



місцях можливої акумуляції поверхневих вод, потрібно своєчасно виконувати укріплювальні роботи, щоб захистити насип від розмивання»; у табл. 6.8 [1] регламентуються підвищені коефіцієнти ущільнення для укісної частини насипів, що підтоплюються.

Таким чином, аналізуючи положення основних діючих нормативних документів на проектування та будівництво земляного полотна автомобільних доріг приходимо до висновку, що на теперішній час не встановлені чіткі вимоги щодо врахування дії тимчасового або постійного підтоплення насипів та призначення для таких насипів розрахункових характеристик ґрунтів. В текстах цих нормативних документів даються лише посилання на необхідність врахування можливості підтоплення і необхідність розрахунку стійкості укосів таких насипів.

Аналіз досліджень і публікацій. Розрахунковими характеристиками ґрунту земляного полотна є: вологість W , модуль пружності E , кут внутрішнього тертя φ та питоме зчеплення c . Відомо, що ґрунт, що розташований нижче рівня ґрунтових вод зазнає зважувальної дії води, що проявляється у вигляді зниження величини питомої ваги ґрунту:

$$\gamma_{sb} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}, \quad (1)$$

де γ_{sb} – питома вага ґрунту з урахуванням зважувальної дії води, кН/м^3 ; γ_w – питома вага води, $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$; e – коефіцієнт пористості.

Можливими нормативними джерелами щодо призначення розрахункових характеристик ґрунтів насипів, що розглядаються могли б бути ДБН В.1.2-15:2009 та ДБН В.2.1-10:2009. У розділі 6 [3] надаються рекомендації щодо визначення характеристичних значень щільності ґрунту (γ_n) та кута внутрішнього тертя (φ_n) на підставі лабораторних досліджень, а при типовому проектуванні для визначення характеристичного тиску ґрунту припускається приймати $\gamma_n = 17,7 \text{ кН/м}^3$ і $\varphi_n = 25^\circ \dots 35^\circ$. Разом з тим у п.6.4 наголошується, що «розвантажувальну силу води враховують завжди у випадках гарантованої фільтрації ґрунтів основи, або в інших умовах, коли розвантажувальна дія призводить до найбільш несприятливих навантажувальних ефектів». В пункті 11.3.16 [2] регламентується, що при розрахунку фундаментів за деформаціями основи слід враховувати можливість підйому рівня підземних вод та пов'язаних з ними виникненням додаткових ефективних напружень у ґрунті, зниження величин модуля деформації ґрунту при його водо насиченні та змін характеристик ґрунту за рахунок зважувальної дії води.

Викладення основного матеріалу. Можливим варіантом укріплення укосів насипів, що підтоплюються є армування укосів геосинтетичними матеріалами (армований укіс або армоґрунтова підпірна стінка), використання габіонних конструкцій, протиерозійний захист укосів.

Згідно з [5] армування ґрунтів (армовані укоси з крутизною до 70° та армоґрунтові підпірні стінки з крутизною до $70^\circ - 90^\circ$) може застосовуватися на підходах до мостів і в берегових опорах мостів (рис.1). Нормами [5] встановлено вимоги щодо конструювання і розрахунку армованого укосу. В тому числі, є посилання на врахування можливого підтоплення. Розрахунок виконують перевіркою внутрішньої, зовнішньої, комбінованої стійкості та придатності до експлуатації.

При розрахунках внутрішньої стійкості визначають загальне армуюче зусилля, яке компенсує дефіцит утримуючих зусиль:

$$T_s = ([K_R] - K_U) \cdot \frac{M_D}{R}, \quad (2)$$

де T_s – сумарне необхідне армуюче зусилля, яке повинне створюватись геосинтетичними полотнами для стабілізації укосу; M_D – обертаючий момент зсувних сил відносно центра кривої обертання; R – радіус кривої обертання і плече моменту від зусилля T_s відносно центра обертання згідно з рисунком 3.3; $[K_R]$ – мінімально допустимий коефіцієнт стійкості армованого укосу.



Рисунок 1 – Принцип армування і стабілізації укосу насипу (відповідно до [5])

Визначення положення центру обертання, радіусу кривої обертання, утримуючих та зсувних сил рекомендується вести за традиційною методикою круглоциліндричних поверхонь ковзання. Разом з тим ні в яких нормативних документах не закріплені положення цієї методики і не з'ясовується які розрахункові характеристики ґрунтів слід приймати. Як наслідок, немає ніяких рекомендацій щодо розрахунку стійкості підтоплюваних укосів.

Наявність рівня ґрунтових вод (згідно з [5]) рекомендується враховувати при визначенні довжини закладення армуючих полотен в ґрунтовий укіс. Анкерування геосинтетичного матеріалу в ґрунтовому масиві забезпечується силами тертя і зчеплення:

$$L_{ei} \geq \frac{T_{Di} \cdot [K_R]}{2 \cdot (c_a + \sigma_{vi} \cdot \operatorname{tg} \delta)} = \frac{T_{Di} \cdot [K_R]}{2 \cdot \alpha \cdot (c + \sigma_{vi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1)}, \quad (3)$$

де L_{ei} – необхідна довжина анкерування i -го полотна (мінімальна величина L_{ei} становить 1 м) згідно з рисунком 3.6; T_{Di} – розрахункова міцність на розтяг i -го полотна; c_a і c – адгезія ґрунту до геосинтетика і зчеплення (когезія) ґрунту; δ – кут тертя між ґрунтом та геосинтетиком; φ_1 – кут внутрішнього тертя ґрунту; α – коефіцієнт взаємодії ґрунту з геосинтетиком; σ_{vi} – ефективний вертикальний тиск на рівні i -го полотна.

Сила тертя залежить від вертикального тиску на рівні закладення прошарку. Для попередження перевищення розрахункових отримуючих зусиль при визначенні вертикального тиску від власної ваги ґрунту рекомендується враховувати зважувальну дію води:

$$\sigma_{vi} = \sigma_q + \gamma_{ci} \cdot H_{ci} + \gamma_{wi} \cdot H_{ВКПi} - \gamma_w \cdot H_{РГВi}, \quad (4)$$

де σ_q – тиск від зовнішнього навантаження; γ_{ci} , γ_{wi} і γ_w – питома вага ґрунту над зоною капілярного підняття і в межах висоти капілярного підняття (ВКП) та питома вага води, відповідно; H_{ci} , $H_{ВКПi}$ і $H_{РГВi}$ – потужність шару ґрунту над ВКП, в межах ВКП і в межах рівня ґрунтових вод (РГВ), відповідно.

Разом з тим, ніяких рекомендацій не надається щодо врахування зміни розрахункових характеристик ґрунту (c , φ_1), та зміни характеристик взаємодії на межі ґрунт-геосинтетик (δ).

В Україні нормами на проектування армоґрунтових підпірних стін є ГБН В.2.3-218-548 : 2010. Цими нормами встановлені загальні вимоги на конструювання, проектування та будівництво підпірних стін з різними варіантами будівництва фасадної частини та з ґрунтовою засипкою, що армована геосинтетичними матеріалами, у звичайних умовах, без урахування можливого підтоплення насипів, а отже, проблема призначення розрахункових характеристик обводнених ґрунтів та характеристик взаємодії цих ґрунтів з армуючи ми матеріалами залишається не вирішеною.

Висновки. Проведеним дослідженням встановлено, що на теперішній час актуальною залишається проблема проектування та будівництва підтоплюваних насипів на автомобільних дорогах. Існуючими нормативними документами лише окреслено проблему і наголошується на необхідності врахування зміни розрахункових характеристик ґрунту в існуючих розрахункових методах стійкості таких насипів, але не встановлені чіткі і послідовні рекомендації та вимоги ні на стадії проектування, ні на стадії будівництва. Нагальним питанням залишається розроблення інженерної розрахункової методики стійкості підтоплюваних насипів, рекомендації щодо можливості застосування певних різновидів ґрунтів в



конструкціях земляного полотна, призначення їх розрахункових характеристик та рекомендацій щодо технології виконання робіт.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.3-4-2007 Споруди транспорту. Автомобільні дороги.
2. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування.
3. ДБН В.1.2-15:2009 Споруди транспорту. Мости і труби. Навантаження і впливи
4. ВБН В.2.3-218-171-2002 Споруди транспорту. Спорудження земляного полотна автомобільних доріг.
5. ВБН В.2.3-218-544:2008 Споруди транспорту. Матеріали геосинтетичні в дорожньому будівництві
6. ГБН В.2.3-218-548 : 2010 Армогрунтові підпірні стінки для автомобільних доріг. Проектування та будівництво
7. <http://plastinka.dp.ua/stroitel'naya-geodeziya/stroitelstvo-na-rechnyx-terrasax.html>



УДК 622.1 :625.745.2

Шилін І.В., канд. техн. наук, Грицук Ю.В., канд. техн. наук, Корольков Р.О., канд. техн. наук

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВОДОПРОПУСКНИХ ТРУБ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ В УМОВАХ ДОНБАСУ

Актуальність. До теперішнього часу методика розрахунку водопропускної труби на міцність в нормативних документах зазнавала деяких змін, які в загальному випадку обумовлені збільшенням значення навантаження та прийнятої моделі навколишнього середовища навколо водопропускної труби. Слід зауважити на те, що із розвитком комп'ютерної техніки та появою спеціального програмного забезпечення при проектуванні штучних гідротехнічних споруд крім плоских методів розрахунку почали застосовуватися просторові моделі для системи «навантаження – насип – труба – основа». Але всі методи розрахунку та розрахункові схеми базуються на одному припущенні – основа може бути представлена різними матеріалами і має значну жорсткість, яка не дозволяє ні в якому разі деформуватися (вертикальні або горизонтальні переміщення не припустимі).

На території Донбасу, в наслідок розробки корисних копалин на значних площах, спостерігаються процеси техногенних деформацій поверхні землі та будівель і споруд, які на ній розташовані. Дослідження [1] показують, що значна частка відказів інженерних споруд обумовлена зміною стану основи. Таким чином можна припустити, що на цих територіях при проектуванні інженерних споруд (і водопропускних труб в тому числі) слід враховувати і зміну стану основи в процесі експлуатації.

Аналіз публікацій. Аналіз публікацій [1, 2] показав, що водопропускні труби є досить розповсюдженими штучними спорудами на автомобільних дорогах. Їх кількість залежить від рельєфу місцевості, але згідно статистичних даних кількість труб на кілометр дороги по областях лежить в межах від 0.8 до 1.3.

Аналіз результатів спостережень за деформаціями водопропускних труб [1, 2] показав, що від 28 до 44 відсотків (в залежності від регіону проведення спостережень) безпосередньо пов'язано із проблемами основи. Ще від 13 до 21 відсотка випадків пов'язані із побічними проявами деформації основи.

Основний матеріал. При розгляді деформацій водопропускних труб в процесі експлуатації на практиці прийнято розглядати три групи деформацій [3, 4, 5]:

- перша група – деформації пов'язані із руйнуванням конструкцій труби та її цілісністю (зміна форми ланок труби, поздовжні та поперечні тріщини в ланках труби, руйнування захисного шару та оголення арматури в тілі труби, деформація або руйнування оголовків, випадки повного руйнування ланок труби, розтягнення ланок труби вздовж вісі, просідання тіла труби відносно оголовків, просідання окремих кілець в тілі труби, просідання насипу над трубою);

- друга група – деформації пов'язані із змінами у роботі труби (підмив оголовків, розмив насипу біля споруди, розмив русел нижнього та верхнього б'єфів, замулювання отворів труби в результаті зміни поздовжніх похилів в процесі експлуатації);

- третя група – деформації пов'язані із «старінням» споруди та «агресією» навколишнього середовища (вітрова та дощова ерозія насипу в місцях розташування труби, вилуджування бетону, корозію бетону або арматури тощо).

В роботі розглянута перша група деформацій, хоча практичними дослідженнями встановлено, що зміна стану основи оказує вплив на всі елементи конструкції труби, тобто викликає всі три групи деформацій.

Завдяки впровадженню нових технологій та матеріалів при будівництві водопропускних труб знайшли застосування гофровані металеві або полімерні конструкції, але вони відносяться до так званих «гнучких» (за жорсткістю) – тобто при розрахунку є обов'язковим врахування деформації самої споруди, а не тільки підсистеми «насип-основа» [4, 6]. Тому на першому етапі для спрощення будемо розглядати тільки «жорсткі» труби (залізобетонні) – тобто для яких, з достатньою для інженерних розрахунків точністю, можливо виконувати розрахунки без урахування деформацій самої споруди.

Слід зазначити, що при розрахунках знайшли застосування дві моделі оточуючого трубу середовища [4, 5, 6]: пружного тіла (основною ідеєю є те, що по контуру труби діють напруження, що відповідають відомим напруженням для косих площадок в умовах плоскої задачі) і сипкого тіла (із достатньою достовірністю можливе використання розрахункових залежностей теорії пружності, відмінністю є тільки заміна коефіцієнта бокового тиску в стані рівноваги на коефіцієнт активного тиску).

Моделі ґрунтової основи для водопропускних труб досить різноманітні але їх можливо згрупувати за наступними ознаками:



- моделі, в яких ґрунтовий масив складається з окремих "осередків" – моделі ґрунтової маси Терцагі, а також реологічні моделі тощо;
- моделі які дозволяють оцінити поведінку всього ґрунтового масиву в цілому - модель основи у вигляді пружного шару кінцевої товщини; модель ґрунтової основи у вигляді пружного ізотропного однорідного напівпростору, модель Вінклера; модель П.Л. Пастернака з двома коефіцієнтами постелі; комбіновані моделі Л.Н. Репнікова і А.П. Синіцина; модель основи у вигляді нелінійного напівпростору; інші моделі (нелінійно деформована основа Вінклера, пружно-в'язкопластична основа, неоднорідна пружна основа тощо);
- моделі реальної ґрунтової споруди або основи – це моделі, які базуються на чисельних методах, які дозволяють одержувати достатньо близькі до аналітичних рішення розподілу напружень під дією розподілених і зосереджених сил без розробки аналітичної залежності - метод скінченних різниць (МСР), метод граничних елементів (МГЕ) і метод скінченних елементів (МСЕ).

Найбільш цікавим для вирішення просторової задачі при розрахунку труби в тілі насипу є метод скінченних елементів, який передбачає дискретизацію суцільного середовища об'єкта деякою кількістю скінченних елементів різної форми і розмірів та дослідження їх напружено-деформованого стану. Цей метод дозволяє розв'язувати задачі, реалізація яких за допомогою аналітичних методів неможлива: це розрахунки просторових конструкцій; врахування чинників будівництва та експлуатації; дослідження об'єктів із складною структурою [5, 7].

Особливою рисою МСЕ є можливість вираховування всіх компонентів досліджуваної системи "навантаження – насип – труба – основа". Тому є можливість розраховувати не тільки складні шаруваті масиви із різними за властивостями матеріалами, а і різноманітні за конструкцією та формою споруди з урахуванням зміни в процесі експлуатації стану основи. В основі визначення напружено-деформованого стану вказаної системи з досліджувального напівпростору розглядають деяку розрахункову область, тобто задача з нескінченним масивом зводиться до задачі з масивом обмежених розмірів. Це дозволяє розглядати систему в плоскій постановці.

Відзначимо декілька важливих переваг МСЕ для розв'язання вказаної задачі.

1. МСЕ дозволяє побудувати зручну схему формування системи алгебраїчних рівнянь щодо вузлових значень шуканої функції. Наближена апроксимація рішення за допомогою простих поліноміальних функцій і всі необхідні операції виконуються на окремому типовому елементі. Потім проводиться об'єднання елементів, що приводить до необхідної системи алгебраїчних рівнянь. Такий алгоритм переходу від окремого елемента до їх повного набору особливо зручний для геометрично і фізично складних систем.

2. Кожне окреме алгебраїчне рівняння, отримане на основі методу скінченних елементів, містить незначну частину вузлових невідомих від загального їх числа. Іншими словами, багато коефіцієнтів в рівняннях алгебраїчної системи дорівнює нулю, що значно полегшує її рішення.

3. Задачі, вирішення яких описується функціями, які задовольняють функціональним рівнянням, носять назву континуальних. На відміну від них вирішення так званих дискретних задач точно визначається кінцевим числом параметрів, що задовольняють відповідній системі алгебраїчних рівнянь. МСЕ, так само як і інші чисельні методи, по суті наближено замінює континуальну задачу на дискретну. Вся процедура такої заміни має простий фізичний сенс. Це дозволяє більш повно уявити собі весь процес рішення задачі, уникнути багатьох можливих помилок і правильно оцінювати отримувані результати.

4. Окрім континуальних задач схема МСЕ застосовується для з'єднання елементів і формування алгебраїчних рівнянь при вирішенні безпосередньо дискретних задач. Це розширює сферу застосування методу.

5. Властивості матеріалів суміжних елементів можуть бути неоднаковими. Це дозволяє застосовувати метод до тіл, складених з декількох матеріалів.

6. Криволінійна область може бути апроксимована за допомогою прямолінійних елементів або описана точно за допомогою криволінійних елементів. Таким чином, методом можна користуватися не лише для областей з «правильною» формою границі.

7. Розміри елементів можуть бути змінними. Це дозволяє укрупнити або подрібнити сітку розбиття області на елементи, якщо в цьому є необхідність.

8. МСЕ дозволяє розглядати граничні умови з розривним поверхневим навантаженням, а також змішані граничні умови.

Таким чином, особливі переваги методу полягають в зручності формування алгебраїчних рівнянь і можливості представлення абсолютно нерегулярних і складних конструкцій і умов навантаження. Популярність методу і інтерес до нього якраз і пояснюються можливістю відображати реальні аспекти, які виникають при розрахунку системи «навантаження – насип – труба – основа».



При розрахунках основи в загальному випадку прийнято, що загальними критеріями визначення розмірів розрахункової області полягає в підборі таких величин, в межах яких виконуються дві умови:

- 1) на межах області вплив напружень від дії навантаженого фундаменту споруди зменшується;
- 2) деформації від дії навантаження на межах області прямують до нуля.

Класична розрахункова схема системи "споруда – основа", яка враховує виконання вказаних умов наведена на рис. 1.

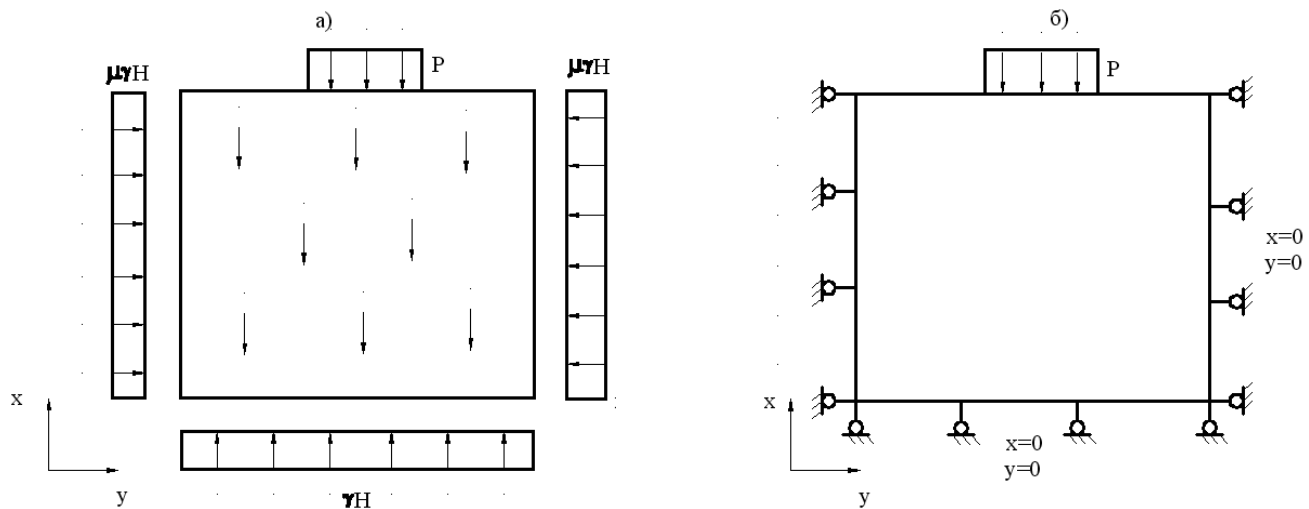


Рисунок 1 - Розрахункові схеми системи "споруда – основа": а) із граничними умовами за навантаженнями; б) із граничними умовами за горизонтальними та вертикальними переміщеннями

Класична розрахункова схема граничних умов системи «насип – споруда» (з обмеженням переміщень по осі x (із боків) та по осі y (з низу обраної області) при розрахунку ґрунтового напівпростору при використанні МСЕ наведено на рис. 2.

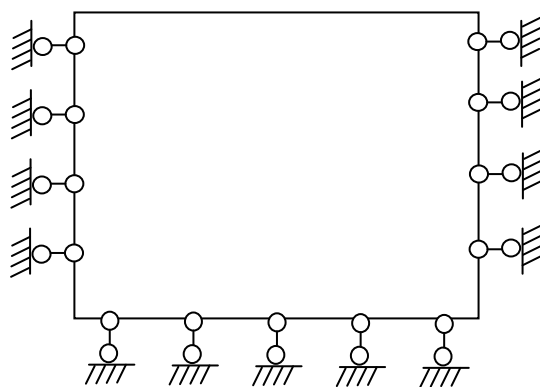


Рисунок 2 - Розрахункова схема граничних умов обраної області системи «насип – споруда»

Розрахункова модель конструкції МСЕ складається з двох частин: розрахункової схеми і набору апроксимуючих функцій. За розрахункову схему можна вважати графічне або зорове представлення конструкції, складене з набору скінченних елементів (СЕ), зв'язків між ними, і граничних умов закріплення.

Тип СЕ визначається:

- його геометричною формою;
- набором вузлів, якими можуть бути точки, як ті що розташовані у вершинах геометричних фігур, так і на їх сторонах, ребрах, поверхнях;
- правилами, що визначають залежність між переміщеннями вузлів СЕ і вузлами системи, – вузли елемента можуть бути прикріплені до вузлів системи жорстко (повний збіг всіх переміщень) або з використанням шарнірів і т.п.;



- фізичним законом, що визначає залежність між внутрішніми зусиллями і внутрішніми переміщеннями, і набором параметрів (жорсткостей), що входять в опис цього закону;
- вибором системи внутрішніх переміщень (деформацій) і відповідних їм внутрішніх зусиль (напружень), що характеризують напружено-деформований стан елементу;
- вибором апроксимуючих (базисних, координатних) функцій, за допомогою яких переміщення довільної точки СЕ однозначно визначаються через переміщення його вузлів;
- набором допустимих навантажень і дій, які можуть бути прикладені безпосередньо до СЕ, і способами їх задавання;
- наявністю або відсутністю правил поділення елементу на дрібніші частки при деталізації опису його напружено-деформованого стану або при уточненні місць додатка навантажень і дій;
- іншими, більш специфічними умовами (можливістю використання тільки в системах певного типу, обмеженнями на орієнтацію по відношенню до системи координат та ін.).

У методі переміщень елементи системи вважаються приєднаними до вузлів розрахункової схеми. Вузол представляється у вигляді об'єкту, що володіє шістьма ступенями свободи – трьома лінійними зміщеннями і трьома кутами повороту. З вузлами можуть бути зв'язані й інші параметри, що визначають деформоване положення системи (додаткові ступені свободи).

Виходячи з принципу віртуальної роботи, для кожного СЕ має бути призначене можливе поле переміщень, що описується апроксимуючими поліномами-функціями форми. Напружений стан кожного СЕ є похідним від функції форми.

Напружений і деформований стан розрахункової моделі розглядається як лінійна комбінація станів окремих елементів системи, що задовільняє умовам спільності деформації і рівноваги.

Наведений алгоритм розрахунку системи «навантаження – насип – труба – основа» має один вагомий недолік – він дуже складний, що змушує використовувати спеціальне програмне забезпечення. Найбільш перспективними на наш погляд є програмні продукти SCAD та Plaxis, в яких приступаючи до розрахунку конкретної конструкції, слід представити конструктивне рішення у вигляді розрахункової схеми, закодувати відповідно всю інформацію про розрахункову модель і отримати ряд числових масивів, кожен з яких має певний смисловий зміст:

1. загальний опис системи і задачі в цілому;
2. структура системи;
3. геометрія системи;
4. граничні умови;
5. характеристики матеріалів;
6. дані про навантаження;
7. дані для обробки результатів.

За вимогами діючих нормативних документів, розрахунок основи і фундаменту інженерних споруд (в тому числі і водопропускних труб) може виконуватися за двома групами граничного стану:

- перша група – за несучою здатністю основ, міцністю і стійкістю конструкцій фундаментів;
- друга група – за деформаціями основ і фундаментів (осідання, крен, просідання, підробка, горизонтальне переміщення).

На практиці найбільше застосування знайшов розрахунок за першою групою граничного стану споруди, але на нашу думку в регіонах схильних до рухливості земної поверхні (основи споруди) слід обов'язково розраховувати споруди за другою групою граничного стану.

У зв'язку з тим, що земляне полотно випробовує деякі деформації згідно із рухливістю основи, то при конструюванні водопропускної труби слід врахувати наві'язуванні зміщення опорних вузлів. Необхідно обов'язково відзначити, що задаватися можуть лише ті переміщення вузла, які у відсутність деформації дорівнюють нулю (нерухомі), тобто цей тип навантаження визначається переміщеннями зв'язків.

Для розрахунку на задані зміщення зв'язків в МСЕ (реалізовано в програмному комплексі SCAD) передбачено використання нуль-елементів. Він є комбінацією послідовно сполучених один з одним пружин додатної жорсткості C і від'ємної жорсткості $-C$. Оскільки для послідовно сполучених елементів податливості $1/C$ і $1/(-C)$ підсумовуються, то отриманий елемент сумарної нульової податливості по відношенню до взаємного зсуву його крайніх вузлів є абсолютно жорстким зв'язком. Якщо в якості зовнішньої дії на систему необхідно прикласти примусове переміщення пари зовнішніх вузлів на величину Δ , то достатньо прикласти до внутрішнього вузла нуль-елемента силу $P = C\Delta$ і зрівноважити її в іншому вузлі. Отже, розрахунок на задане переміщення еквівалентний розрахунку на силу P , прикладену у вузлі, за напрямком, співпадаючим з напрямком переміщення.

Очікуване значення вертикального або горизонтального переміщення (зрушення) ґрунтової основи в регіонах розробки вугілля підземним способом визначається згідно із діючими нормативними документами [8]. Запропонована методика дозволяє розрахувати значення переміщень як в центрі поверхні деформації



земної поверхні (максимальне значення) так і в будь якій точці, яка розташована не обов'язково на головних вісях поверхні деформації (зрушення). Також є можливість отримання напрямку можливого переміщення (зрушення), що також має велике значення при розробці розрахункової схеми.

Більш того, необхідно в розрахунках враховувати коефіцієнт розпушення ґрунтових порід в наслідок зрушення ґрунтової товщі.

Аналіз публікацій результатів досліджень [1, 2, 7], виконаних фахівцями, дозволяє припустити, що аналогічні процеси відбуваються і в інших регіонах, різниці тільки в значенні переміщень та в функції, яка описує характер протікання деформації. Тобто це актуально не тільки для Донбасу.

Врахування форми і значень переміщення основи внаслідок зрушення покрівлі ґрунтових порід над гірничими виробками дозволить не тільки більш реально врахувати умови роботи споруди, а і частково компенсувати негативний вплив за рахунок конструктивних особливостей водопропускної труби (підібрати оптимальну довжину ланки труби, визначитися із способом об'єднання ланок труби, підібрати оптимальну довжину блоків фундаменту, розробити раціональну схему розміщення ланок труби відносно блоків фундаменту тощо). Принципова розрахункова схема наведена на рис. 3

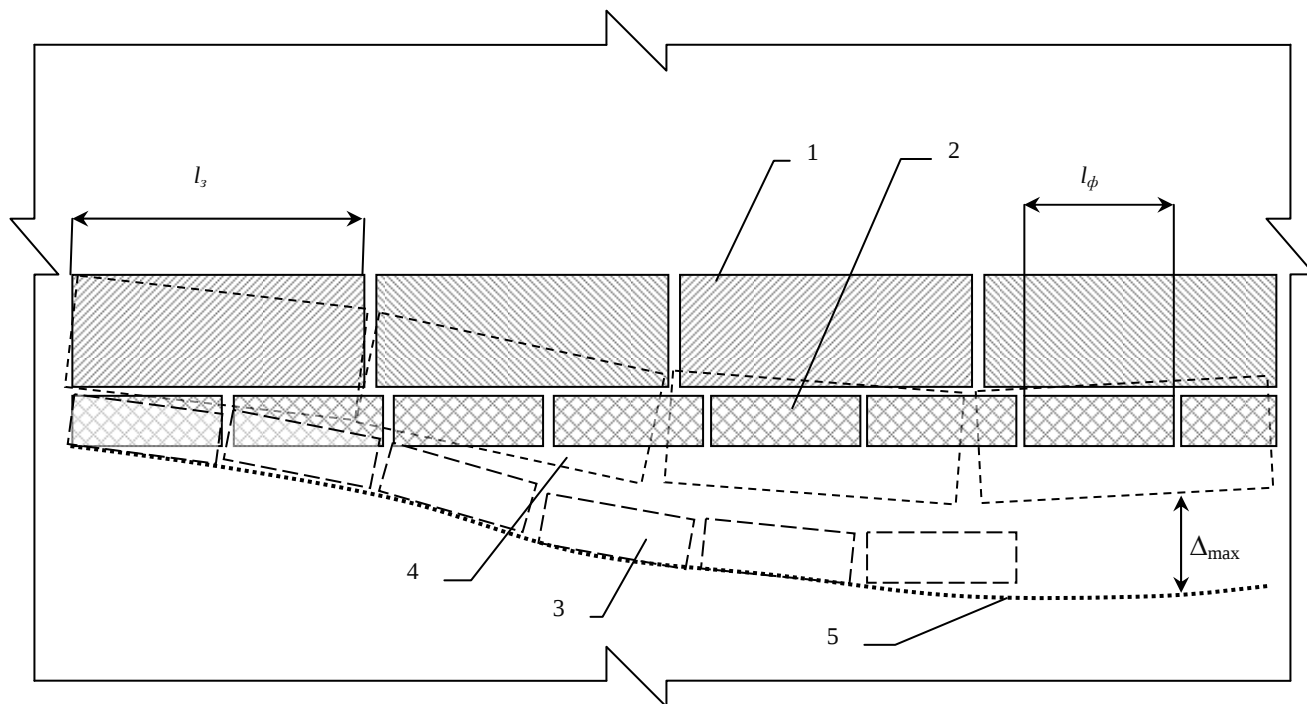


Рисунок 3 – Розрахункова схема деформації водопропускної труби внаслідок переміщення (зрушення) основи: 1 – проектне положення ланки труби; 2 – проектне положення блоку фундаменту; 3 – положення блоку фундаменту після переміщення; 4 – положення ланки труби після переміщення; 5 – очікувана лінія опису переміщення основи; l_s – довжина ланки труби; l_ϕ – довжина блоку фундаменту; $\Delta_{\max}$ – максимальне значення вертикального переміщення на ділянці.

Більш того, досвід експлуатації штучних споруд в тілі насипу (в тому числі і водопропускних труб) показує, що між конструкцією споруди і основою можливе утворення місцевих зазорів, величина і область поширення яких неоднакова в різних зонах під плитою. Порухування контакту плити з основою відбувається в результаті багатократної дії на конструкцію зовнішнього навантаження (зміни зовнішніх температурних умов, порушення водного режиму основи, техногенна деформація земної поверхні, багатократне прикладання навантаження від транспортних засобів, слабка основа тощо).

При багатократній дії зовнішніх навантажень відбувається накопичення залишкових просадок ґрунту основи конструкції споруди. При цьому фундамент (або ланки труби при безфундаментній конструкції) в окремих місцях перестає опиратися на ґрунтову основу і починає працювати як консольна або однопрогінна балка. Навантаження консолі викликає збільшення згинаючих моментів у порівнянні з моментами при щільному контакті (щільної обійми). В результаті несуча здатність конструкції знижується, а її прогини збільшуються.

При експлуатації водопропускної труби є значна ймовірність потрапляння води в її основу (крім того, що вертикальне зрушення основи обумовлює зміну просторового положення ланок труби по відношенню до проектного, в наслідок чого пошкоджується гідроізоляція). В результаті руху води



відбуваються розмивання і винесення матеріалу основи і, як наслідок, утворення порожнеч під фундаментом. Таке погіршення схеми роботи плит призводить до їх перенапруження. Таким чином, оскільки між фундаментом і основою може бути відсутній контакт, то на розрахунковій схемі в заданій області зазору слід приймати нульові коефіцієнти постелі основи. Тобто врахування неповноти опору поверхні конструкції труби на зрушену основу підвищить адекватність розрахунку.

Висновок. Використання МСЕ при розрахунках системи «навантаження – насип – труба – основа» дозволяє більш реально враховувати регіональні особливості при проектуванні, будівництві та експлуатації малих штучних споруд з метою підвищення їх надійності та довговічності. На стадії проектування водопропускної труби є можливість варіантного вибору найбільш вірогідного результату розрахунку за необхідними критеріями.

Література

1. Протяжність і характеристика автомобільних доріг загального користування. – К.: Укравтодор, 2009. – 11 с.
2. Правила осмотра и оценка технического состояния водопропускных труб на автомобильных дорогах: сто 01-2011. – Красноярск: КГБУ «Управление автомобильных дорог по Красноярскому краю», 2011. -18с.
3. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування ДБН В.2.3-22:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 52 с.
4. Методические указания по расчету оснований водопропускных труб по деформациям. – М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1974. – 15 с.
5. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / Клепиков С.Н. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
6. Система забезпечення надійності і безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – К.: Держбуд України, 2006. – 78 с.
7. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений [А.С. Городецкий, В.И. Зоворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов]. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
8. Правила підробки будівель, споруд та природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001-2003. – Чинний від 2003–11–22. К. : Мінпаливенерго України, 2003. – 126 с.– табл. – (Національні стандарти України). – Текст: ріс., укр.



УДК 625.7/8:338

Шпиг А.Ю.

МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ВТРУЧАННЯ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВОДОВІДВОДУ

Ключові слова: система водовідводу, рівень втручання, рівень обслуговування, марківський процес.

Анотація. У статті розглянуто підхід щодо визначення експлуатаційного стану елементів водовідводу та обґрунтування рівня втручання.

Постановка проблеми. Система водовідводу – це одна з складових конструкції автомобільної дороги. Від стану водовідводу залежить стан земляного полотна і, в решті, дорожнього одягу. Відновлення стану елементів водовідводу потребує техніко-економічного обґрунтування так званого рівня втручання – мінімального значення параметрів елементу, при якому потрібно відновлювати його стан, що являє собою складну задачу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Починаючи з другої половини минулого століття вчені почали звертати велику увагу на стан автомобільних доріг, який повинен відповідати сучасним вимогам. Одним з факторів, які впливають на стан автомобільної дороги є система водовідводу. У світі зроблені спроби для обґрунтування експлуатаційних станів водовідводу [1, 2]. Але обґрунтування рівня втручання, що впливає на вибір ремонтних заходів потребує глибокого і повного вивчення.

Постановка завдання. Розробити модель обґрунтування рівня втручання для елементів водовідводу.

Виклад основного матеріалу. Велику роль у забезпеченні нормального функціонування автомобільної дороги відіграє система водовідводу. У залежності від стану земляного полотна та системи водовідводу в процесі експлуатації дороги виникає необхідність виконання різних видів ремонтно-відновлювальних робіт, пов'язаних з підвищенням стійкості і працездатності земляного полотна, удосконалення форми та приведення його геометричних параметрів у відповідність до нормативних вимог.

Відповідно до Закону України «Про автомобільні дороги», до споруд дорожнього водовідводу відносяться бокові канами, водовідвідні канами, водопропускні труби, відкриті та закриті дренажні системи, зливові каналізація, тощо [3].

Протягом життєвого циклу всі елементи дороги піддаються процесу деградації, тобто процесу погіршення своїх властивостей (рис. 1). Прийнято, що елементи дорожнього водовідводу протягом життєвого циклу перебувають послідовно в одному з п'яти експлуатаційних станів [4]. Віднесення окремого елементу до певного експлуатаційного стану відбувається на основі візуальних спостережень або вимірювань.

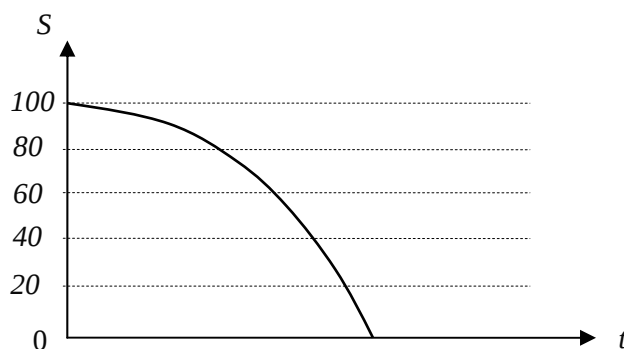


Рис.1. Процес деградації елемента водовідводу дороги протягом життєвого циклу

Кожному експлуатаційному стану відповідає певний рейтинг, який має верхню та нижню границі. Рейтинг стану елементу визначається на основі спостереження рівня серйозності і рівня розповсюдження пошкоджень елемента. Рівень серйозності визначає ступінь пошкодження елемента, а рівень розповсюдженості – поширеність пошкодження (чи пошкодження існує на всьому елементі, чи на деякій його частині).



Під час процесу деградації відбувається накопичення пошкоджень, що виникають в результаті зносу елемента, тобто стан елемента погіршується. Такий процес зручно описати за допомогою марківського процесу [5] (рис. 2).

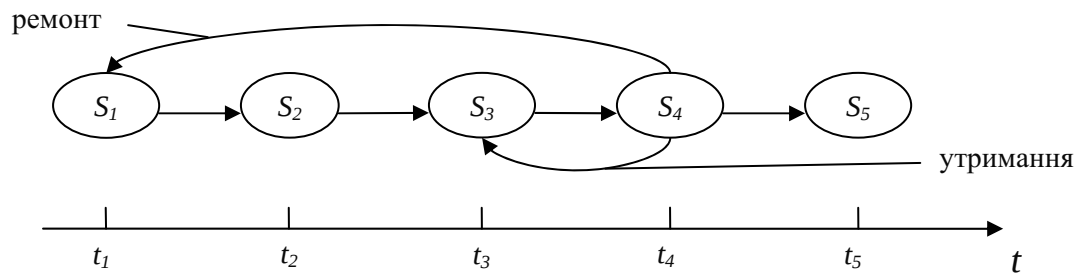


Рис. 2. Процес деградації елемента за Марковим

Процесу деградації протидіє процес відновлення, тобто процес проведення певних ремонтно-відновлювальних заходів, який дозволяє перейти з гіршого стану в кращий. Але процес відновлення відбувається не безперервно, а через деякі проміжки часу. Тому, для того щоб визначити час, коли потрібно виконувати роботи необхідно мати певний критерій. Таким критерієм може бути рівень втручання - це такий розмір пошкодження, при якому необхідно виконувати певні ремонтно-відновлювальні заходи. Графічно цей процес можна зобразити наступним чином:

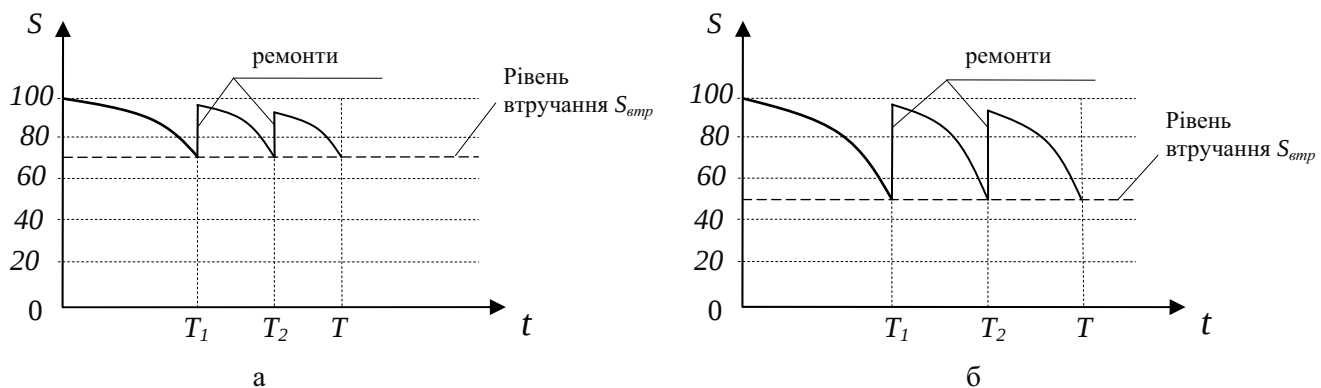


Рис. 3. Процес деградації елемента водовідводу з своєчасним проведенням ремонтних заходів

Обґрунтування рівня втручання визначається як деяка оптимізаційна задача. Тобто, щоб підтримувати вищий стан елемента потрібно частіше проводити ремонтні заходи, і навпаки, що впливає на вартість робіт.

Для опису вищезгаданих процесів можна використати підхід, який викладено в роботі [6] та інших. Ймовірнісний розподіл елементів водовідводу в рік t визначається вектором X_t . Зміна у станах описується матрицею ймовірностей переходу P . Дана матриця використовується для того, щоб визначити стан елемента у наступному році, $t+1$:

$$X_{t+1} = P^T \cdot X_t \quad (1)$$

де, P^T – транспонована матриця.

Елементи P_{ij} в матриці P показують ймовірності переходу, де i – стан елемента в рік t , j – стан у рік $t+1$. Так як частина елементів водовідводу утримуються постійно та щорічно, а частина залишається не утриманою, тобто продовжує піддаватися процесу деградації, то і ймовірнісна матриця переходу також поділена на дві частини. Елементи ймовірнісної матриці переходу (таблиця 1, як приклад) визначаються наступним чином:



$$P_{ij} = a_i \cdot M_{ij} + (1 - a_{i,t}) \cdot D_{ij} \quad (2)$$

де, M_{ij} – елемент матриці, який щорічно утримується;

D_{ij} – елемент матриці, який піддається процесу деградації;

$a_{i,t}$ – частка елементів водовідводу у стані i , що утримані в рік t , при чому $0 \leq a_{i,t} \leq 1$.

Шуканою змінною за даним розрахунком являється $a_{i,t}$.

Таблиця 1. Ймовірнісна матриця переходу станів елементів водовідводу

Стан елементу у рік t	Стан елементу у рік $t+1$				
	1	2	3	4	5
1	0,8	0,2	0	0	0
2	0	0,86	0,14	0	0
3	0	0	0,91	0,09	0
4	0	0	0	0,88	0,12
5	0	0	0	0	1

Відповідно до даної моделі, будь-який дорожній елемент залишається в початковому стані або переходить в інший – гірший стан. Таким чином, тільки ті елементи матриці, що піддаються процесу деградації, для яких $j = i$ чи $j = i + 1$ – відмінні від нуля. Елементи водовідводу, що знаходяться у найгіршому стані залишаються у ньому до тих пір, доки не відбудуться певні ремонтно-відновлювальні заходи. Це призведе до того, що вони перейдуть у кращий стан, ніж поточний. Крім того, усі елементи матриці, де відбувається щорічне обслуговування, для яких $j \leq i$ (нижня трикутна матриця) можуть бути відмінними від нуля.

Таким чином, після проведення ремонтно-відновлювальних заходів збільшується строк служби елементів, а в комплексі всі елементи подовжують строк служби автомобільної дороги. Відповідно до цього ймовірнісна матриця переходу станів елементів водовідводу після процесу відновлення матиме вигляд:

Стан елементу у рік t	Стан елементу у рік $t+1$				
	1	2	3	4	5
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0,15	0,85	0	0	0
4	0	0,89	0,11	0	0
5	0	0,75	0,25	0	0

Перебування елементів водовідводу у поганому стані вимагає більших витрат на їх майбутнє відновлення і суттєво впливає на стан земляного полотна та дорожнього одягу. Вартість відновлення кожного стану та загальну вартість відновлення в рік t можна розрахувати за формулою:

$$C_t = N \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m x_{i,t} a_{i,t} c_{i,t} \cdot R \quad (3)$$

де N – протяжність елементу водовідводу;

K – кількість видів елементів;

m – кількість станів;

$x_{i,t}$ – частка елементів водовідводу у стані i в рік t ;

$a_{i,t}$ – частка елементів водовідводу у стані i , що утримані в рік t ;

$c_{i,t}$ – вартість обслуговування у стані i в рік t ;

R – коефіцієнт впливу на дорожньо-транспортні витрати.

Приймаючи до уваги відсутність аналітичних залежностей для кривої деградації (рис.1), доцільно дискретизувати криву, розділивши для потрібної точності кожен стан елементу на декілька частин. Це



робиться тому що рівень втручання має рейтинговий показник, а за марківським процесом використовується поняття стану. Тому, доцільно буде зробити такий поділ і присвоїти рівню втручання значення стану, який буде складатися, наприклад, з десяти балів за рейтингом. У такому випадку, стан S_1 , що має рейтинг від 100 до 80 балів, буде додатково поділений на дві частини: a і b (рис. 4). Аналогічно відбувається поділ решти станів.

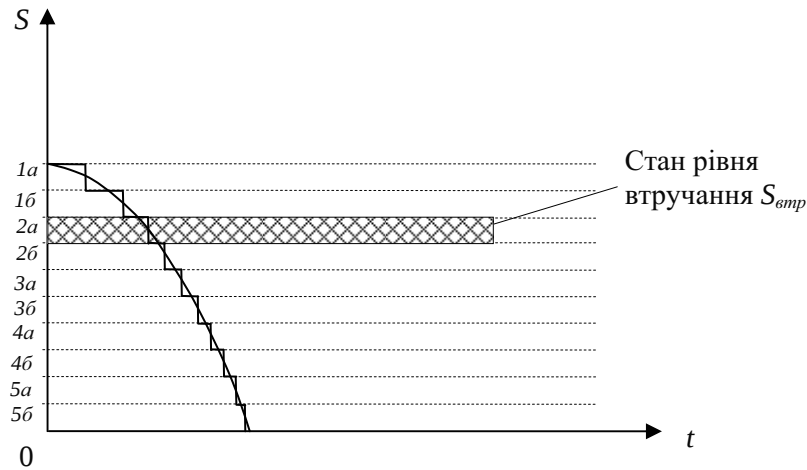


Рис. 4. Дискретизована крива деградації

Відповідно до такого поділу матриця переходу станів елементу водовідводу також збільшиться в два рази і матиме наступний вигляд:

Стан елементу у рік t	Стан елементу у рік $t+1$									
	1a	1б	2a	2б	3a	3б	4a	4б	5a	5б
1a	0,95	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0
1б	0	0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0
2a	0	0	0,84	0,16	0	0	0	0	0	0
2б	0	0	0	0,78	0,22	0	0	0	0	0
3a	0	0	0	0	0,91	0,09	0	0	0	0
3б	0	0	0	0	0	0,89	0,11	0	0	0
4a	0	0	0	0	0	0	0,93	0,07	0	0
4б	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0,1	0
5a	0	0	0	0	0	0	0	0	0,85	0,15
5б	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Для оптимізації потрібно виконати перебір варіантів з різними станами рівня втручання та вибрати той варіант, при якому значення вартості відновлення буде найменшою. Це дозволить більш раціональніше використовувати державні кошти. Вирішення проблеми обґрунтування рівня втручання не тільки для елементів водовідводу, але й для інших елементів автомобільних доріг – дуже важливе завдання для України, так як нині дорожня галузь функціонує в умовах обмеженого фінансування. Але на сьогодні таку роботу можливо провести тільки за наявності статистичної інформації. Тому з вищесказаного випливає ще одна важлива задача – створення банків даних про наявність автомобільних доріг, на основі яких можна буде реалізувати даний підхід.

Висновок. Застосування запропонованої моделі дає можливість розрахувати вартість відновлення елементів водовідводу при різних рівнях втручання.

Література

1. Highway Maintenance Levels of Service. Manual. Prepared for Colorado Department of Transportation // prepared by Cambridge Systematics, Inc. - December 22, 1999. – 78 pp.
2. Отраслевой дорожный методический документ. Руководство по оценке уровня содержания автомобильных дорог (временное). ОДМ 218.0.000-2003. // Росавтодор – 2004 г. – 72с.



3. Закон України «Про автомобільні дороги» від 8 верес. 2005 року № 2862-IV. // Голос України. – 2005. – 07 жовт. – № 189. Із внесенням змін до Закону України від 20 грудня 2011 року № 4203-VI.
4. Інструкція по визначенню рівнів експлуатаційного стану автомобільних доріг державного значення та їх елементів. ІН В.3.1-218-336:2010 // Укравтодор. – 48с.
5. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації. // Вісник ТАУ та УТУ. – К., РВВ УТУ. – 1999. – Вип. 3. – с. 59-63.
6. Antti Ruotoistenmäki. Road maintenance management system – a simplified approach / Quantitative Methods of Economics and Management Science. – Helsinki School of Economics. – October 2007. – 25pp.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОКОВ С АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Одной из основных задач повышения технического уровня автомобильных дорог, безопасного движения и экологической безопасности их эксплуатации является обеспечение своевременного и целенаправленного сбора и отвода воды с поверхности автомобильных дорог с последующей ее очисткой от загрязнений. Пренебрежение этой проблемой имеет весьма отрицательные последствия как для эксплуатации дорог (снижение прочности дорожных одежд, нарушение стойкости земляного полотна, сокращение межремонтных сроков и др.), так и для уровня безопасности и удобства движения транспортных средств [1].

Сток ливневых и талых вод, образующихся в результате выпадения атмосферных осадков на территорию городов и поселков, является одним из основных источников загрязнения почв и объектов гидросферы. Исследование влияния транспортных средств на окружающую среду, чаще всего сводятся к оценке загрязнения воздушной среды и шумового уровня, и незначительное внимание уделяется ингредиентному загрязнению дорожными поверхностными стоками прилегающей к автомобильной дороге и мостовому переходу территории, водоемов и грунтовых вод [1-3].

В крупных городах и на загородных скоростных автомобильных трассах поверхностный сток представляет собой значительные объемы сточных вод, которые зачастую без очистки, с концентрациями загрязняющих веществ, в несколько раз превышающих предельно допустимые значения, поступают в водные объекты и на прилегающую территорию. Наибольшую экологическую опасность в этих сточных водах представляют нефтепродукты, в состав которых входят олефины, циклические и ароматические соединения, кетоны, альдегиды и другие органические вещества. Отрицательное влияние поверхностного стока с автомобильных дорог на окружающую среду связано также с содержанием в сточных водах взвешенных частиц различной природы и соединений, которые используются для противогололедных мероприятий [2-6].

Экологическая опасность загрязненного поверхностного стока для почв прилегающих территорий и водоемов кардинально возрастает при отсутствии или неадекватности системы сбора поверхностных вод с покрытия проезжей части дорожно-мостовых сооружений и отвода стоков на очистку. В решении проблемы отвода и очистки воды с поверхности автомобильных дорог особое место занимают исследования, направленные на усовершенствование методологической базы проектирования и расчета систем поверхностного водоотведения с целью разработки оптимальных проектно-строительных решений и ремонтно-восстановительных мероприятий. Несмотря на наличие типовых инженерных решений по устройству поверхностного водоотведения, ряд вопросов как типового, так и индивидуального проектирования до сих пор требуют уточнения, углубленного изучения и обобщения накопленного опыта [1, 3-4]. Важнейшим элементом, закладываемым в предпроектные и проектные разработки систем водоотведения, является технологический анализ сточных вод - установление степени и природы загрязнения воды, выявление возможности применения тех или иных методов очистки и особенностей поведения компонентов сточных вод в процессе обработки, обоснование методов управления процессами очистки воды. Это исследование, типичное для проектирования систем отведения и очистки городских и промышленных сточных вод, для объектов водоотведения на автомобильных дорогах имеет свои особенности. Так, в отечественной научно-технической литературе мы не обнаружили стандартизованные методики отбора проб стоков с автомобильных дорог.

Цель работы: технологический анализ состава и осветляемости поверхностных стоков с автомобильных дорог, получаемых методом смывов.

Объект исследования: смывы с территории автомобильной стоянки и автомобильных дорог с различной интенсивностью движения транспорта в г. Харькове.

Для получения проб поверхностного стока с автомобильных дорог использовали известный в микробиологии метод: смыв ватным тампоном в определенный объем дистиллированной воды (500 см^3) с задаваемой площади дорожного покрытия ($\sim 1500 \text{ см}^2$, которую обозначали деревянной палеткой). Период без дождей перед отбором проб составлял 2 недели. В полученных смывах согласно нормативным методикам по анализу сточных вод определяли рН среды электрометрическим методом, концентрацию взвешенных веществ и концентрацию органических соединений во взвешенных веществах (после прокаливании при $t 800^\circ\text{C}$) - гравиметрическим методом, концентрацию ионов NH_4^+ - с реактивом Несслера.



Исходя из площади смыва и объема смывающей воды можно по формулам расчетов характеристик поверхностного стока, разработанным в различных нормативных документах (СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения», «Улаштування поверхневого водовідведення на територіях міст і селищ» СОУ ЖКГ 41.00-35077234. 0018:2009. Рекомендації забезпечення ефективного відведення міських зливових стоків та визначення параметрів очисних споруд. Посібник до ДБН), пересчитать получаемые гидрохимические показатели смывов в характеристики, адекватные тем, которые получают при анализе реального дождевого смыва с дороги.

Сильный ливень дает слой воды более 40 мм, а небольшой дождь - 1-2 мм. В г. Харькове уровень осадков за теплый сезон года составляет около 300 мм, а количество сильных ливней – 5-8. Таким образом, средний уровень осадков за интенсивный дождь составляет около 46 мм. В наших исследованиях уровень воды (h), создаваемый смывом составлял:

$$h = \frac{500 \cdot 10}{1500} \approx 3,3(\text{мм})$$

Самые высокие концентрации загрязнений в ливневых стоках наблюдаются в первые 10-20 мин дождя, т.е. в период, который составляет 40-60% продолжительности интенсивного дождя. Следовательно, в первые 10-20 мин дождя выпадает до 23 мм осадков. Таким образом, исследуемые стоки с автомобильных дорог, получаемые методом смывов, были приблизительно в 7 раз концентрированнее реальных, образующиеся в первые 10-20 мин дождя.

Расположение участков автомобильных дорог, где проводились смывы, и интенсивность движения на них представлены на рис. 1 и в табл. 1.



Рис. 1 - Участки отбора проб смывов

Таблица 1. Интенсивности движения на обследованных участках автомобильных дорог г. Харькова

№ пробы	Участок исследования	Интенсивность движения, авт./час
1	угол ул. Шевченко и Бутовского въезда (обочина)	36-1468
2	ул. Шевченко перед остановкой Управление МЧС (обочина)	1364-легковых, 104-грузовых
3	автомобильная стоянка Управления МЧС	
4	ул. Шевченко, после остановки Управление МЧС (обочина)	1364-легковых, 104-грузовых
5	въезд на автомобильную заправку по ул. Шевченко (середина дороги)	44 легковых и грузовых
6	Бутовский въезд (середина дороги)	36 легковых и грузовых

Как видно из данных табл. 1, наибольшая интенсивность движения автомобилей наблюдалась на участках № 2 и № 3 (ул. Шевченко), а наименьшая - на участках № 5 и № 6 (въезд на автомобильную заправку и Бутовский въезд).

Наиболее распространенным методом очистки смывов с автомобильных дорог является механический, а именно, отстаивание для удаления взвешенных веществ. На осаждаемость взвешенных



веществ оказывает влияние целый ряд факторов, в том числе дисперсный и химический состав взвешенных веществ. Данные исследования взвешенных веществ в полученных смывах представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики взвешенных веществ в полученных смывах с дорог

№ пробы	Концентрация взвешенных веществ, мг/дм ³	Концентрация неорганических взвешенных веществ		Концентрация органических взвешенных веществ	
		мг/дм ³	% от массы взвешенных веществ	мг/дм ³	% от массы взвешенных веществ
1	2132	1670	78,3	462	21,7
2	1566	1192	76,1	374	23,9
3	1927	709	36,8	1218	63,2
4	1028	739	71,9	289	28,1
5	628	444	70,7	184	29,3
6	1061	704	66,4	357	33,6

Как видно из данных табл. 2, наибольшая концентрация взвешенных веществ наблюдалась в пробе № 1 (угол ул. Шевченко и Бутовского въезда), а наименьшая – в пробе № 5 (въезд на автомобильную заправку). Фактически участок № 1 находится на пути стока с ул. Шевченко, поэтому характеристики его смывов ближе к характеристикам смывов с участков ул. Шевченко, а не Бутовского въезда. Таким образом, в полученных результатах отмечается корреляция между интенсивностью движения автотранспорта и концентрацией взвешенных веществ в смывах с дорог. Абсолютное значение концентрации взвешенных веществ в полученных смывах превышает концентрации взвешенных веществ, установленных различными авторами непосредственно в поверхностном стоке с дорог [3-6], в 2-10 раз (в среднем в 6 раз), что корреспондируется с нашими расчетами концентрирования загрязняющих веществ в получаемых искусственно смывах. Важную информацию для решения вопросов о методах очистки сточных вод представляет фракционирование взвешенных веществ по химической природе: определение концентрации органических и неорганических компонентов. Основная масса органических веществ в частицах, суспендированных в смывах с автомобильных дорог, представлена тяжелыми нефтепродуктами, образующимися главным образом в результате истирания дорожного покрытия и автомобильных шин [1, 5, 6]. Как видно из полученных данных, самая высокая концентрация органических соединений среди взвешенных веществ наблюдается в смыве с территории автостоянки (проба № 3 - 63,2%) и с покрытия Бутовского въезда, на котором также паркуются автомобили (проба № 6 - 33,6%). Ориентировочная концентрация тяжелых нефтепродуктов в смывах с участков, где происходит парковка автомобилей (пробы № 3 и № 6), определенная по доле органической компоненты взвешенных частиц, составляет от 357 до 1218 мг/дм³, а в пересчете на первые 20 мин дождя - 51-174 мг/дм³. На других исследованных участках доля органических веществ во взвешенных частицах составляет от 21,7 до 29,3 %, а их концентрация (от 184 до 462 мг/дм³) положительно коррелирует с интенсивностью движения. Таким образом, даже при учете разбавления в реальных смывах после 10-20 мин дождя ориентировочная концентрация суспендированных нефтепродуктов в смывах с дорог может достигать 60 мг/дм³.

Прямое определение концентрации нефтепродуктов в полученных смывах с автомобильных дорог (экстракция гексаном), выявило значительно более низкие концентрации этого загрязнения, что свидетельствует о том, что нефтепродукты в модельных смывах представляют собой нерастворимые в воде высокомолекулярные соединения, затруднительно экстрагируемые органическими растворителями.

Экспериментальные исследования установили низкую эффективность осаждаемости взвешенных веществ в полученных смывах с автомобильных дорог. Одна из причин такого явления - присутствие в водной среде тяжелых суспендированных нефтепродуктов (табл. 3). Песчаная фракция в смывах осаждается в течение нескольких секунд, а затем осветление жидкости практически прекращается.

Как свидетельствуют полученные данные, даже через 2 ч отстаивания концентрация взвешенных веществ в обрабатываемой сточной воде остается высокой и в ряде проб даже при расчетном разбавлении в реальных условиях (в 7 раз) недопустимой для сброса в природные водоемы. Таким образом, для обработки смывов с автомобильных дорог типового 2-х часового отстаивания недостаточно.

Исследования химического состава полученных смывов показали, что в них присутствуют повышенные концентрации аммонийного азота (табл. 4).



Таблица 3. Концентрация взвешенных веществ в модельных стоках после 2-х часового отстаивания

№ пробы	Концентрация взвешенных веществ, г/дм ³
1	0,42
2	0,29
3	0,65
4	0,31
5	0,29
6	0,84

Таблица 4. Концентрация аммонийного азота и активная реакция среды в смывах с автомобильных дорог

№ пробы	pH водного смыва	Концентрация N-NH ₄ , мг/дм ³
1	7,81	4,6
2	8,70	3,1
3	7,51	13,2
4	8,65	3,4
5	8,41	3,7
6	7,81	13,4

Как свидетельствуют приведенные данные, отмечается определенная корреляция активной реакции среды в смывах с дорог с интенсивностью движения автомобилей: чем выше интенсивность, тем выше значение pH смывов. Самые высокие концентрации аммонийного азота установлены в смывах с участков, где происходит парковка автомобилей (автомобильная стоянка, Бутовский въезд). Даже с учетом разбавления смыва в первые 10-20 мин дождя по сравнению со смывом, получаемым искусственно (в 7 раз), концентрация аммонийного азота в смывах с этих участков может достигать экологически опасных концентраций и требует специальных мероприятий для очистки.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод оценки прогнозного состава стоков с автомобильных дорог с помощью анализа искусственных смывов позволяет объективно установить абсолютные концентрации загрязняющих веществ и количественные соотношения между ними.
2. Технологический анализ установил в смывах с автомобильных дорог высокое содержание тяжелых фракций нефтепродуктов, которые отрицательно влияют на осаждение взвешенных веществ. В схеме очистки таких сточных вод необходимо предусматривать специальные мероприятия по интенсификации осаждаемости взвеси (коагуляция, флокуляция) в отстойниках или применять другие методы очистки.
3. В смывах с автомобильных дорог на участках парковки автомобилей установлено повышенное содержание аммонийного азота, что согласуется с данными других авторов [1, 4, 6]. Для очистки смывов с автомобильных дорог от этого загрязнения необходимо предусматривать специальные мероприятия.
4. Предложенный метод позволяет прогнозировать уровень экологической опасности стоков с конкретных участков автомобильных дорог для природных водных и почвенных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильина А.А. Влияние автомобильного транспорта на загрязнение поверхностных стоков с автомобильных дорог и мостов // [Ильина А.А.] / Новости в дор. деле: Науч.-техн. информ. сб. / ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР». – М.: 2004. - Вып. 2. – С. 29-36.
2. Мостепан О.В. Оцінка впливу забруднення зливових вод з поверхні автомобільних доріг на навколишнє середовище: Дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. – Харків, 2004. – 251 с.
3. Евгеньев И.Е. Автомобильные дороги в окружающей среде / [Евгеньев И.Е., Каримов Б.Б.] — М.: ООО «Трансдорнаука», 1997. — 285 с.
4. Леонов Е.А. Проблемы очистки сточных вод с поверхности автомобильных дорог на примере кольцевой автомобильной дороги вокруг Санкт-Петербурга // [Леонов Е.А., Михайлова М.С.] / Жизнь и безопасность. – 2002.- № 3. - С. 280-286.





5. Wong T. Water sensitive road design - design options for improving stormwater quality of road runoff // [Wong T., Breen P., Lloyd S.] / Technical report, Cooperative Research centre for catchment hydrology. – 2000. - 83 p.
6. Polkowska Ż. Evaluation of pollutant loading in the runoff waters from a major urban highway (Gdansk Beltway, Poland) // [Polkowska Ż., Skarżyńska K., Dubiella-Jackowska A., Staszek W., Namieśnik J.] / Global NEST Journal, Vol 9, No 3. – 2007. – P. 269-275.

