

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УВЕЛИЧЕНИЕ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, НА НАДЕЖНОСТЬ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

*Кутуев М.Д. Иманалиев Т.О.
КГУСТА им Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика*

Обоснование надежности долговечности инженерной конструкции с помощью вероятностных методов, фактически речь идет о перевозке ГСМ на юг КР.

Несмотря на высокую затратность реабилитации, создания, и эксплуатации инфраструктурных объектов, процесс развития транспортной системы является важным источником экономического роста и имеет значительный потенциал для создания новых рабочих мест и сокращения бедности.

В течение 1999-2001 годов все виды транспорта функционировали бесперебойно и способствовали в целом удовлетворению потребностей экономики и населения в данном виде услуг. За 2001 год пассажирооборот всех видов транспорта возрос на 5.3% против уровня 2000 года, в том числе автомобильного транспорта - на 9,6%, железнодорожного – на 11,8%.

Автомобильные дороги являются важнейшим звеном единой транспортной системы [1] инфраструктуры экономики Кыргызской Республики. На долю автомагистралей приходится основной объем перевозок грузов и пассажиров. Проложенные через многочисленные перевалы, они являются единственными транспортными путями, соединяющими экономические районы, разделенные горными хребтами.

В Кыргызстане давно сложилась опорная сеть автомобильных дорог, которая связывает все регионы и области республики и обеспечивает выход в соседние страны Центральной Азии и далее – в Россию и европейские страны, а также в КНР и транзитом в Пакистан и в Индию.

Общая протяженность автомобильных дорог в Кыргызской Республике [2] составляет более 34.0 тыс. км, из них около 19.0 тыс. км являются дорогами общего пользования. Из общей сети автодорог большее значение в функционировании экономики имеют магистральные дороги международного значения. В результате постоянного расширения и совершенствования экономических связей страны нагрузка транспортного потока по автодорогам значительно увеличилась. Практически вся сеть дорог осталась открытой для проезда всех типов автомобилей из государств ближнего и дальнего зарубежья.

В стране проводится работа по улучшению состояния и содержания автомобильных дорог общего пользования. При финансовой поддержке Азиатского Банка Развития, Исламского Банка Развития, Правительства Японии успешно осуществляется проект реабилитации стратегически важной дороги Бишкек-Ош. Планируется начало работ по региональному проекту «Реабилитация автомобильной дороги Бишкек - Алматы». При поддержке Всемирного Банка реализуется проект развития городского транспорта, важным компонентом которого является реконструкция дорог в городах Бишкек, Ош, Джалал-Абад.

Вместе с тем, техническое состояние автомобильных дорог общего пользования республики находится в крайне неудовлетворительном состоянии. Транспортно-эксплуатационные показатели и технический уровень автомобильных дорог по основным направлениям транспортных потоков не соответствуют современным требованиям перевозок и безопасности дорожного движения. Из общей протяженности дорожной сети более 60% дорог не имеют усовершенствованных покрытий и менее 20% дорог имеют дорожные одежды, пригодные для пропуска большегрузных автомобилей.

Ухудшение сети автомобильных дорог республики, которое имеет устойчивую тенденцию, прямо связано с нестабильным финансированием. Ежегодно выделяемые средства обеспечивают всего лишь 18-20% от общей годовой потребности дорожной отрасли республики.

Основной целью развития сети автомобильных дорог республики является обеспечение устойчивого автомобильного сообщения между всеми населенными пунктами, приведение дорог в соответствие с международными техническими требованиями.

Для развития экономики страны важным является реконструкция основных автомобильных дорог общей протяженностью 4594 км. Из них приоритетному инвестированию с целью реконструкции и реабилитации подлежат транзитные межгосударственные, межрегиональные участки и дороги с интенсивным движением общей протяженностью 2682 км. Это такие дороги, как: Бишкек- Кара-Балта –Ош – Сары-Таш – Иркештам; Бишкек – Нарын – Торугарт; Балыкчы – Чолпон-Ата – Каракол – Боконбаево – Балыкчы; Ош – Исфана, в том числе обходная дорога Кок –Талаа – Пульгон – Бурганды – Баткен; Суусамыр – Талас – Тараз; Алматы – Бишкек – Ташкент, участок Георгиевка (Кордой) – Чалдовар, Кочкор – Дыйкан – Кара-Кече.

Дорога будет построена в двух категориях. Ширина составит 15 метров, толщина – 15 сантиметров. Если прежняя дорога была приспособлена с нагрузкой на ось для 10-ти тонного груза[1], то новая дорогая – для 11,5 тонн.

Очередной конфликт между дорожниками и перевозчиками разгорелся из-за постановления правительства о запрете передвижения по автомобильным дорогам общего пользования и дорогам международного значения внутри КР большегрузных автотранспортных средств с превышением максимально разрешенных общей массы, осевой нагрузки и других линейных параметров.

Постановление правительства подписано 8 августа 2011 года и вступило в силу 1 января 2012 года. Согласно новым правилам, запрещается передвижение по дорогам республики грузовых машин, общая масса которых вместе с грузом превышает 44 тонны. При том что большинство бензовозов страны весят в среднем 46 тонн.

С 1 января грузовики начали проверять на всех пунктах весогабаритного контроля, кроме двух – "Сосновка" и "Кара-Куль".

Приняв постановление о запрете передвижения большегрузных автотранспортных средств, правительство буквально запретило перевозку ГСМ на юг страны, заявил президент Ассоциации нефтетрейдеров Жумакадыр Акенеев.

Весь объем ГСМ на юг республики поставляется автомобильным транспортом. А по новым требованиям порядка 95% большегрузных автомобилей в Кыргызстане не соответствуют новым требованиям. В связи с этим в настоящее время поставки ГСМ на юг Кыргызстана сокращены на 40%. На пункте весового контроля в селе Сосновка стали накапливаться очереди машин.

Возмущенные таким положением дел перевозчики готовы пойти на крайние меры и в знак протеста на три недели прекратить перевозки ГСМ, чтобы показать таким образом невозможность исполнения новых норм закона.

Ежемесячно в Кыргызстане потребляется и перевозится 60-80 тыс. тонн ГСМ, из них 25-30 тыс. ежемесячно транспортируется на юг.

Управление весогабаритного контроля и тоннельной службы Министерства транспорта и коммуникаций, разработавшее постановление, просит не делать односторонних выводов и войти в их положение. Требования к весу машин появились не просто так. Главная автомагистраль страны – дорога Бишкек - Ош - уже приходит в негодность. Серьезная деформация дорожного полотна уже сильно заметна в Суусамырской долине. И все из-за тяжелогрузных машин. Если требования к грузовым автомашинам не применить сегодня, через 1-2 года дороге потребуются капитальный ремонт – очень недешевое удовольствие.

Минтрансу отступать некуда. Если с этого года правила не начнут действовать, ремонт дороги правительству обойдется еще дороже. За 2 года с апреля 2010, когда весогабаритный контроль не проводился, дорога жизни превратилась в дорогу смерти. К тому же это единственный дорожный коридор соединяющий север и юг страны. И потеря его чревата самыми неожиданными последствиями.

Цена вопроса

Если не запретить движение тяжеловозов, правительству уже сейчас нужно задуматься о поиске денег на капитальный ремонт дороги через несколько лет.

С другой стороны, соблюдая требования по общей массе автомобилей, перевозку ГСМ необходимо осуществлять менее тяжелыми грузовиками, что увеличит стоимость топлива на юге в среднем на 5 сомов.

Фасе-контроль

Перевозчики заявляют о своем автопарке как почти о самом современном. За последние годы фирмы подкупили грузовики европейского и американского производства, у которых нет проблем во всем мире, а в Кыргызстане к ним придираются. На этот вопрос у Минтранса тоже есть ответ. Все дело не в весе машины и даже не в его грузе, а в цистернах. Как уточнили в управлении, эти цистерны компании заказывали в Китае и не предусмотрели, что их нужно делать легче, чем они есть сейчас. В итоге цистерна утяжеляет машину на 1-3 тонны.

В настоящее время новые правила не соблюдают практически только бензовозы. Причем превышение составляет немного – 1-3 тонны. Но от этого никому не легче. Правила должны соблюдаться. Остальные перевозчики разгружают машины до необходимых параметров и перегружают товар в другие машины.

По мнению же Минтранса только 50% грузовых автомашин не вписываются в требования.

Интересно, что международные перевозчики полностью соблюдают новые требования и от них нет жалоб, сообщили в Минтрансе. Практически такие же требования действуют во всем мире. Например, в Казахстане и Германии также нельзя ездить машинам, полная масса которых превышает 44 тонны, в Польше – 42 тонны, в России и Узбекистане – 40 тонн, в Беларуси и на Украине – 38 тонн.

Конфликт на грани решения

Затягивать с решением этого вопроса никто не собирается. Минтранс уже обратился в проектно-исследовательский институт "Кыргыздортранспроект" с просьбой рассчитать возможность снижения требований к автомашинам с 44 тонн до 46 и то, как это отразится на дорожном полотне.

"Кыргыздортранспроект" представит свои расчеты со всеми вытекающими выводами в ближайшие дни, обещают в Минтрансе. И дальше 2 варианта развития события – Минтранс позволяет ездить машинам весом до 46 тонн или перевозчики находят пути облегчения своих автомашин.

Дополнительная информация по Ali Riza Usta 40 т.л.

Объем цистерны полуприцепа-бензовоза – 40 т.л. Тип полуприцепа: Цистерна (бензовоз) предназначенная для перевозки светлых нефтепродуктов. Цистерна бензовоза: Цистерна цилиндрической формы, изготовлена из стали СТ52А1, толщина стенки – 4 мм. Цвет окраски цистерны оранжевый или по выбору покупателя с нанесением корпоративного логотипа. Количество секций бензовоза: 5 Шасси цистерны: Подвеска пневматического типа с системой подъема первой оси. Применяется 3-х осевая система турецкого производства OSMAN KOC. Нагрузка на ось 9 - 12 т. Расстояние между осями 1310 мм. Используется тормозная система EBS Wabco с регулировкой и распределением нагрузки. Применяются 6+1 бескамерных шин GOODYEAR. Существует два различных подхода к определению показателя надежности: - прямой и косвенный.

Зависимость, положения в основу измерения показателя качества, надежность является свойством технического объекта, составляющим вместе с другими свойствами качество, называется уравнением измерения [4].

Прямое измерение показателя надежности в форме вероятности безотказной работы определяется уравнением вида [4]

$$P^*(t \geq t_3) = 1 - cm(t_3)$$

$P^*(t \geq t_3)$ - статистическая оценка вероятности

m - отсчитываемая величина в эксперименте величина, характеризующая измеряемое качество, т.е. число объектов.

$c = 1/N$ - единичное значение измеряемой величины P^* (N – число испытываемых объектов)

Прямое измерение показателя надежности (не только в форме вероятности безотказной работы) является ни чем иным как статистической оценкой вероятности безотказной работы по частоте появления события, называемого отказом.

Косвенным [5] считают измерения, уравнения которых представляют измеряемую величину

$P^*(t \geq t_3)$ - в виде явной функции нескольких аргументов [6]

$$P^*(t \geq t_3) = f(x, u, \dots, y; a, b, t, \dots),$$

x, u, \dots, y - измеряемые переменные (аргументы), a, b, t, \dots - параметры.

Описание причины явления необходимо исследовать модель [5] (гипотезы и аналогии, отражающие реальный объективно - существующий мир, должны обладать наглядностью или сводиться к удобным для исследования логическим схемам).

$t_0 = 15$ лет – срок службы, дорога 3 категории, ширина 10 м, асфальтобетон высота 5 см, интенсивность движения N - до 3000 авт/сутки, с разрешенной осевой нагрузкой до 10 т.

Здесь все параметры остаются неизменными, кроме осевой нагрузки. Осевая нагрузка увеличивается до 12 т.

В основном деформация происходит в дневное время при $t > 35^\circ$ т.е. если ввести ограничение в летнее время днем.

Литература

1. Каменецкий Б.И. Автомобильные дороги. М. Транспорт, 1979.
2. Сайт Государственной службы дорожного хозяйства, Мин. Транса. К.Р.
3. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М. Стройиздат, 1982.
4. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л. Энергия, 1968.
5. Куюнджич С.М. Модели надежности технических объектов. Сб. трудов междунар. Конфер. "Надежность и управление" – Арх, 2000.
6. Бальшев И.А., Клепиков Л.В. Статистический анализ данных о температурах воздуха для расчета конструкций. Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1976.

ТЕОРИЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рудаев Я.И., Сеитов Б.М., Ордобаев Б.С.
 Кыргызско-Российский Славянский университет,
 Кыргызская Республика, г. Бишкек, КР.
 e-mail: ordobaev@mail.ru

THEORY OF EVALUATION OF CARRYING CAPACITY CONCRETE STRUCTURES

Kyrgyz-Russian Slavic University,
 Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic.
 e-mail: ordobaev@mail.ru

Настоящая статья рассматривает вопросы проектирования зданий и сооружений по прочности и несущей способности строительных конструкций. В статье приведены расчеты строительных конструкций методом предельного равновесия. Даны необходимые сведения о реализации метода предельного равновесия и принципы, и ход решения их задачи.

The real article examines the questions of planning of building and building on durability and bearing strength of building constructions. To the article the calculations of building constructions are driven by the method of maximum equilibrium. Necessary information is given about realization of method of maximum equilibrium both principles and motion of decision of their task.

Расчет по предельному равновесию статически неопределимых систем впервые предложен венгерским инженером Б.Казинчи в 1913-году. Дальнейшее развитие получил в научных работах датских ученых А.Игерсслева и К.Иогансена. Особые значения для развития методов расчета строительных конструкций по стадии предельного равновесия имелись в работах профессоров А.А.Гвоздева, А.Р.Ржаницына, Л.М.Овенина, Г.К.Хайдукова, Н.А.Ахвледияни, М.И.Ерхова, Д.Д.Ивлева, А.С.Дехтяря, А.М.Проценко, С.Б.Смирнова, А.А. Чираса и многих других ученых мира.

Как известно, прочностной расчет конструкций - одна из основных задач строительной механики. Ранее прочностной расчет производился по допускаемым напряжениям и вообще исключал появление в конструкции конечных пластических зон. Поэтому он приводил к существенному перерасходу материала. В настоящее время введён метод расчетных предельных состояний, который содержит два принципиальных новшества. Первое - это расчленение единого коэффициента запаса K на три отдельных коэффициента, имеющих четкий физический смысл:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 .$$

Здесь, K_1 - коэффициент надежности по материалу, учитывающий изменчивость прочностных свойств материала, K_2 - коэффициент надежности по перегрузке, отражающий изменчивость нагрузки и воздействий, и наконец, K_3 - коэффициент, отражающий изменчивость условий работы материала и конструкции, которые не могут быть отражены в расчетах прямым путем.

Второе новшество состоит в переходе от критерия оценки прочности конструкции по разрушению её в одной наиболее опасной точке, найденной из "упругого" расчета, к критерию предельного состояния конструкции в целом, найденному на основе метода предельного равновесия.

Современный прочностной расчет железобетонных конструкций отличается от их расчета по методу предельного равновесия лишь тем, что найденная в начале на основе метода предельного равновесия предельная нагрузка q_0 делится затем на коэффициент запаса

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

В результате получается величина расчетной эксплуатационной нагрузки $q_s = q_0 \cdot K^{-1}$, где $K = 1,4 : 1,6$. То есть, найдя сначала предел несущей способности системы q_0 из рассмотрения её предельной стадии, мы затем грамотно отступаем в эксплуатационную стадию находим нагрузку $q_s = q_0 \cdot K^{-1}$. Только зная предельную нагрузку, можно обоснованно назначить величину эксплуатационной нагрузки q_s .

Прочностной расчет, основанный на анализе условий предельного равновесия конструкций, правомерен лишь при наличии пластических свойств в их материале. Прочностной расчет системы из абсолютно хрупкого материала (типа стекла) следует производить только по допускаемым напряжениям.

Пластичность или текучесть материала - это его способность деформироваться (течь) при постоянном напряжении $\sigma = \sigma_T = \text{const}$, называемом пределом пластичности или текучести материала при одноосном сжатии или растяжении.

Последние исследования в теории метода предельного равновесия сняла почти все ограничения и

условия его применимости. Единственное условие, которое не может быть снято - это условие о существовании достаточно большой площадки пластичности материала на диаграмме " $\sigma - \mathcal{E}$ ". Она должна быть настолько велика, чтобы могла исключить хрупкое разрушение начальных пластических зон до формирования тех последних пластических зон, которые обращают систему в механизм.

Метод предельного равновесия основан всего на двух принципах (или теоремах) : кинематическом и статическом. Истинная предельная нагрузка q_0 равна тонной нижней границе - ,, *inf* " множества её верхних оценок $\{q_i^+\}$, отвечающих множеству всех кинематически возможных механизмов пластического разрушения системы, то есть $\inf \{q_i^+\} = (q_i^+)_{min} = q_0$. При этом механизм, дающий q_0 - истинный.

Во-первых, следует как-то задаться конфигурацией любого механизма (то есть схемой размещения его пластических зон), а также кинематически возможным полем скоростей его перемещений в системе координат $\{X_j\}$ ($j=1;2;3$)

Конкретных рекомендаций о способе их задания метод предельного равновесия не даст. Это поле $\{V_i\}$ должно удовлетворять условиям неразрывности деформаций Коши :

$$\mathcal{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

Во-вторых, составляется выражение для мощности внешней нагрузки А на этом поле скоростей: (пусть $Y_1=U$; $V_3=W$; $V_2=V$; $X_1=X$; $X_2=Y$; $X_3=Z$):

$$A_{внеш.} = \int_S (quU + qvV + qwW) ds = \sum_S^i \int qv_i V_i ds \tag{1}$$

В третьих, из условий Коши $\frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\} + \left\{ \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right\} = \mathcal{E}_{ij}$ (2)

по компонентам V_i , V_j находится компоненты поля скоростей деформаций \mathcal{E}_{ij} и по ним составляется выражение для мощности внутренней энергии:

$$W_{внутр} = \int_V \partial_{ij} E_{ij} dV \tag{3}$$

где компоненты поля напряжений $\{\sigma_{ij}\}$ удовлетворяют условию пластичности $\Phi(\sigma_{ij})=0$ и связаны с $\{\mathcal{E}_{ij}\}$

законом течения: $\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} = K \mathcal{E}_{ij}$

При наличии пластического изгиба находятся скорости кривизн:

$$x_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial E_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial E_{ij}}{\partial x_j} \right\} \tag{4}$$

из известных уравнений Коши. При этом (3) принимает вид:

$$W_{внутр} = \sum_S \int (X_{ij} \cdot M_{ij}) ds \text{ или } W_{внутр} = \sum_{i=1}^n h_i Q_i M_{oi} \tag{5}$$

В неоднородном поле напряжений (или усилий) компоненты поля напряжений $\{\sigma_{ij}\}$, моментов $\{M_{ij}\}$ или других усилий находятся по соответствующим им компонентам поля скоростей деформаций $\{\mathcal{E}_{ij}\}$; или кривизн $\{X_{ij}\}$; или других скоростей $\{B_i\}$. Они взаимосвязаны Ассоциированным законом течения и условием пластичности.

Условие пластичности $\Phi(\sigma_{ij}) = 0$, или $\Phi(M_{ij})=0$; или $\Phi(M_{ij}, N_{ij})=0$ определяет условие перехода материала конструкции в пластическое состояние при том сочетании напряжений $\{\sigma_{ij}\}$ или моментов или моментов или других усилий, $\{M_{ij}, N_{ij}\}$, которые действуют в конструкции.

Ассоциированный закон течения как бы заменяет обобщенный закон Гука в пластической стадии. Он устанавливает связь между полем напряжений (усилий) в пластических зонах и полем соответствующих им скоростей пластических деформаций $\{\sigma_{ij}\} \rightarrow \{\mathcal{E}_{ij}\}$ или $\{M_{ij}\} \rightarrow \{X_{ij}\}$

Закон течений записывается как : $\mathcal{E}_{ij} = \frac{\partial \Phi(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \cdot K$ (6)

$$x_{ij} = \frac{\partial \Phi(M_{ij})}{\partial M_{ij}} \cdot K \tag{7}$$

где $\Phi(\sigma_{ij})$ или $\Phi(M_{ij})$ - условия пластичности. K и K - неизвестные константы. Закон течения (6); (7) не дает абсолютные значения величин ε_{ij} или X_{ij} только их соотношение $\varepsilon_{ij}/\varepsilon_{ik}$. Закон течения по Физическому смыслу означает, что вектор скорости деформации \mathcal{E} нормален к кривой условия пластичности $\Phi(\sigma_{ij}) = 0$.

Особенности статического принципа метода предельного равновесия в том, что истинная предельная нагрузка q_0 равна точной верхней границе "SUP" множества её нижних оценок $\{q_{kj}^-\}$, отвечающих множеству всех равновесных и "стабильных" полей напряжений, построенных в данной системе, то есть $SUP\{q_{kj}^-\} = (q_{kj}^-)_{max} = q_0$. ("Стабильным" назовем поле $\{\sigma\}$ нигде не нарушающее условий пластичности материала $\Phi(\sigma_{ij}) = 0$). Поле $\{\sigma\}$, дающее q_0 , обязательно является истинным лишь в пластических зонах. В "упругих" зонах оно может отличаться от истинного упруго-пластического поля $\{\sigma\}$.

Комбинация кинематического и статического решений дает двухстороннюю оценку для $q_0 : q_{max}^- \leq q_0 \leq q_{max}^+$. Если окажется, что $q_{max}^- = q_{max}^+$ то можно утверждать, что найдено точное значение $q_0 = q_{max}^- = q_{max}^+ = q_0^{ист}$ получено полное решение задачи предельного равновесия. В этом случае поле $\{\sigma\}$, дающее параметр $q_{max}^- = q_0$, в точности соответствует пластическим зонам истинного механизма разрушения и его напряжения здесь совпадают с напряжениями, определяемыми законом течения $\sigma_{ij} = k\varepsilon_{ij}$ из уравнений

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial \Phi(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad \text{и условием текучести } \Phi(\sigma_{ij}) = 0$$

Точную величину предельной нагрузки q_0 иногда можно найти только на основе статического принципа, если удастся построить такое поле $\{\sigma\}$, которое образует пластические зоны, заведомо обрабатывающие систему в некоторый механизм, (то есть кинематика отчасти здесь присутствует).

Зная предельную нагрузку q_0 , решаем "проверочную" задачу прочностного расчета, находя расчетную эксплуатационную нагрузку для конструкции как $q_0 = q_0 (K_1 K_2 \cdot K_3)$. В "проверочной" задаче заданы все геометрические параметры системы (Li) и прочностные параметры $\{\sigma_0, k\}$, и надо найти её предельную q_0 или эксплуатационную q , нагрузку в функции от этих параметров:

$$q_0 = f[(\sigma, k)(hi)] \quad (9)$$

$$\text{Если же надо найти} \quad \sigma_0 = f^{-1}[q, (hi)] \quad (10)$$

то это уже "прямая" задача. В "прямых" задачах прочностного расчета или предельного равновесия задана по величине нагрузка q_0 или и надо найти некоторые параметры конструкции, например предельный момент M_0 в функции от неё:

$$M_0 = f^{-1}[q, (hi)] \quad (11)$$

Заключение

Таким образом, что "прямую" задачу можно решить, используя лишь статический принцип, если построить любое равновесное поле $\{\sigma\}$, например "упругое" $\{\sigma q^{уп}\}$ или иное поле напряжений $\{\sigma q\}$ и назначить параметры системы так, чтобы была обеспечена "стабильность" этого поля. Для такого подхода нужно, чтобы соотношение предельных усилий в элементах системы можно было бы назначать достаточно произвольно.

Литература

1. Смирнов С.Б., Сеитов Б.М. Расчет строительных конструкций по прочности и несущей способности (учебное пособие). – Ош.: ОшГУ, 1997. – 117 с.
2. Смирнов С.Б., Мондрус В.Л., Бунятов В.Ю. Расчет рамы методом предельного равновесия. – М.: МИСИ, 1991.
3. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. - М.: ВШ, 1986. -607 с.
4. Сеитов Б.М., Ордобаев Б.С. Некоторые вопросы теории прочности и деформации бетона. Наука и новые технологии, №1-2013, Бишкек, с.41-49

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БОКОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Мавлянов А.С., **Бейсембин К.Р.

*Национальная Академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика
**Таразский Государственный университет им. М.Х. Дулати, г.Тараз, Казахстан
kbeisembin@mail.ru

CALCULATION OF LATERAL FILTER WATER INTAKE BUILDING

**Mavlyanov A.S., **Beyssembin K.R.

*National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic
**Taraz State University, named after M.H. Dulati, Taraz, Kazakhstan
kbeisembin@mail.ru

Расчетами установлены основные факторы пропускной способности плотины: пористость плотины, диаметр частиц материала плотины, входной напор и ширина плотины.

Ключевые слова: Плотина, напор, пористость, глубина, скорость, диаметр, фильтрация, коэффициент, лоток, зона, сооружения.

Calculations are set the basic factors of carrying capacity of weir : porosity of weir, diameter of particles of material of weir, entrance pressure and width of weir.

Keywords: Weir, pressure, porosity, depth, speed, diameter, filtration, coefficient, tray, zone, building.

Эффективным методом борьбы с поступлением наносов в боковой отвод могут быть боковые фильтрующие водозаборы, устраиваемые на берегах и откосах водотоков в виде каменнонабросной дамбы из местных материалов. В этом случае требуется установить закономерности взаимодействия гидравлических процессов, протекающих в русле водотока и в теле боковой фильтрующей плотины.

Практический интерес представляет изучение гидравлических явлений в системе водоток — боковая фильтрующая плотина и разработка методики расчета таких систем.

На практике фильтрующие сооружения широко используются в дорожном строительстве, когда канал пересекает дорогу: вместо моста или водопропускного сооружения устраиваются дамбы из фильтрующих материалов (камень, щебень, галька и др.). К недостаткам подобных сооружений относится быстрое закупоривание поровых пространств дамбы взвешенными наносами и плавающими предметами, что приводит к потере ее пропускной способности. Поэтому основное внимание при разработке конструкции фильтрующих сооружений уделялось сохранению их работоспособности.

Анализ показывает, что существующие фильтрующие сооружения служат для забора воды из открытого водоема, озера или водохранилища.

Основным элементом водозаборов является фильтрующая дамба, в которой используются различные фильтрующие материалы (камень, щебень, галька и т. п.), однако в результате биологической и волновой активности водоема дамбы кольматируются планктоном, водорослями, илом, мусором, что ведет к снижению пропускной способности и срока службы (в среднем до 2 лет).

Для устранения недостатков используются береговые дамбы, выполненные из сильнофильтрующих материалов, используемых в роли водозаборных очистных сооружений для водоснабжения и орошения. Они не разрушают естественный режим реки или канала, защищают (восполняя роль отстойников) от наносов, плавающего мусора и шуги, производят первичную очистку воды.

Русла предгорных и горных рек, имеющие естественные и хорошо фильтрующие основания по всему смоченному периметру боковых стенок и дна, могут отфильтровать необходимое количество чистой воды без наносов в ближайшие от русла (естественные или искусственные) водоемы.

Устройство фильтрующей насыпи в теле береговой дамбы выполняет функции:

- забор воды из реки в расположенное рядом водохранилище для последующей подачи воды с целью орошения или водоснабжения;
- защита от наносов;
- заградительное пространство для рыб и др.

При отборе части расхода из водотока происходит деление потока. Часть расхода отделяется, когда появляется возможность образования гидравлического уклона, а следовательно, скорости большей, чем существовавшая ранее в этом направлении.

Процесс деления потока при боковом отводе осуществляется на сравнительно небольшом участке водотока, обычно соизмеримом с его шириной. На этом участке течение теряет характер плавно изменяющегося, если оно имело его до отбора части расхода. Естественный режим при этом изменяется в связи с перераспределением поля скоростей, уменьшением естественного расхода, понижением уровня и деформации свободной поверхности, и на участке водозабора движение жидкости приобретает типичный пространственный характер.

Решение пространственной задачи гидравлики связано, как известно, с большими трудностями, несмотря на некоторые достигнутые успехи (расширение свободной турбулентной струи в неограниченном пространстве, плановое расширение спокойного потока в ограниченной акватории и др.), имеется ряд попыток использовать для этой цели теорию плоского потенциального потока. Полученные приближенные решения исходят из заведомо схематизированных условий (плоское дно, горизонтальная сводная поверхность, постоянная по глубине скорость), поэтому возможности их практического использования ограничены.

Наряду с такими решениями существует ряд работ, предлагающих более простые решения, основанные на применении различных методов, используемых в гидравлике. Необходимо отметить, что деление потока в случае боковых фильтрующих водозаборных сооружений имеет ряд особенностей, к которым можно отнести наличие фильтрующей плотины с шероховатой и проницаемой стенкой, ее влияние на структуру деления потока в основном русле и т.д. В этом случае возникает задача установления закономерностей взаимодействия гидравлических процессов, протекающих в русле водотока и в теле боковой фильтрующей плотины, и увязки законов движения воды в основном русле с фильтрационными законами в теле плотины. Главной особенностью деления потока при наличии боковой фильтрующей плотины является то обстоятельство, что движение воды в теле плотины и в основном русле водотока подчиняется различным закономерностям.

Поэтому при процессе деления потока необходимо произвести стыковку условий на границе раздела: основное русло — тело плотины. Так как границей раздела является шероховатая и проницаемая поверхность, то взаимное влияние двух потоков происходит в целой области, обусловленной наличием пограничного слоя.

В настоящее время отсутствуют работы, рассматривающие процессы, протекающие в системе водоток — боковая фильтрующая плотина.

На основании обработки результатов собственных опытов Форхгеймер предложил описывать процесс фильтрации уравнениями:

$$J = \alpha v + \beta v^2; \quad (1)$$

$$J = \alpha v + \beta v^2 + \gamma v^3. \quad (2)$$

При малых скоростях течения жидкости слагаемыми скорости во второй и третьей степенях можно пренебречь. Отсюда Форхгеймер сделал вывод о применимости основного закона фильтрации для расчетов сравнительно медленных потоков. В настоящее время (1) носит название закона Дюпи—Форхгеймера.

Эксперименты показывают [1], что при числе Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (3)$$

где d - средний диаметр слагающих грунт частиц, больших 10 мм, зависимость между Re и d перестает быть линейной.

При числах Рейнольдса, больших 150, фильтрационный поток, по-видимому, становится турбулентным, хотя резкого перехода из ламинарного режима в турбулентный не наблюдается.

В случае сильно турбулентной фильтрации вместо (1) обычно пользуются зависимостью

$$J = \beta v^2, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{1}{K_T^2}$;

K_T - коэффициент турбулентной фильтрации.

Коэффициенты ламинарной и турбулентной фильтрации или коэффициенты α и β в (2) определяются из экспериментов и обычно при гидравлических расчетах считаются постоянными. В действительности эти коэффициенты зависят от многих факторов: точки пористой среды, направления фильтрационного потока, продолжительности фильтрации, пористости среды, формы и структуры зерен, расположения зерен, жидкости и т. д.

В случае турбулентной фильтрации для определения коэффициента K_T в каменной наброске С. В. Избаш предложил формулу [2]

$$K_T = \left(20 - \frac{14}{d_s}\right) n \sqrt{d_s}, \quad (5)$$

где d — эквивалентный диаметр частиц.

С. В. Избашем и Н. М. Лелеевой предлагается формула, учитывающая коэффициент формы зерен [3]:

$$K_T = 28,7 \frac{n^{3/2}}{\sqrt{(-n)\psi}} \sqrt{d_s}. \quad (6)$$

Значения ψ принимаются в следующих пределах: для шаров $\psi = 1$; для округленных фракций $\psi = 1,25 \dots 1,65$; для угловатых фракций $\psi = 1,65 \dots 2,35$.

Отсутствие экспериментальных исследований по определению влияния параметров частиц фильтрующего материала затрудняет проектирование соответствующих гидротехнических сооружений. Определенное теоретическое и практическое значение в этой связи имеют исследования, связанные с установлением и оценкой зависимости конструктивных параметров дамбы на ее пропускную способность.

Лабораторные исследования, представленные в работе, проводились с целью определения степени влияния на пропускную способность фильтрующей дамбы:

- напора воды;
- средней скорости потока в лотке;
- диаметра частиц фильтрующего материала и пористости плотины;
- длины и ширины фильтрующей дамбы.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории гидравлики. Опыты были проведены на модели фильтрующей плотины прямоугольного поперечного сечения, установленной у боковой ступени гидравлического лотка в виде бокового водозабора под углом отвода 90° к оси лотка. Гидравлический лоток имеет прямоугольное поперечное сечение шириной 0,65 м, высотой 0,4 м, длиной 10 м. Модель фильтрующей боковой плотины с поперечными размерами $1 \times 0,4$ и длиной 0,6 м имеет непроницаемые боковые стенки и бетонное дно.

Равномерный режим в лотке поддерживается с помощью концевого затвора, выполненного в виде вертикальных шандорных спиц.

Для определения положения депрессионной кривой в теле фильтрующей дамбы по оси плотины на расстоянии 10 см устанавливались пьезометры. Опыты начинались подготовкой фильтрующей дамбы, включающей засыпку бокового отвода фильтрующим материалом определенных фракций, установление ширины и длины дамбы. С подачей в лоток определенного расхода и после реализации установившихся гидродинамических процессов производились замеры уровня воды в лотке и расходов ее в процессе прохождения через фильтрующую дамбу.

Изменение ширины дамбы осуществлялось установлением на определенном расстоянии в теле плотины непроницаемой перегородки и закрыванием определенной части верхнего откоса непроницаемой пластинкой.

Диаметры частиц, из которых слагалась плотина, принимались равными 1, 2 и 3,5 см. Для диаметров частиц 1 и 2 см проводились по девять серий опытов с различной шириной и длиной фильтрующей плотины. Ширина плотины $B = 33; 66; 100$ см. Длина плотины — 30; 40; 60 см, а для диаметра 3,5 см проводились четыре серии опытов с $B = 5; 100$ и соответственно 40; 60 см. В каждой серии опытов значение пористого тела плотины определялось общепринятым методом [1]. Внутри серии изменялась глубина воды в лотке, которая поддерживалась с помощью концевого затвора. Общий расход лотка изменялся в пределах 4...9 л/с. Каждая серия состояла из 12 опытов, в которых глубина в лотке принимала четыре значения в пределах 9,8...25 см, при постоянном общем расходе. В каждом опыте определялись: средняя скорость воды в лотке по формуле

$$u_0 = Q_0 / H_0 \cdot L \quad (7)$$

где Q_0 — общий расход;
 H_0 — глубина воды;
 L — ширина лотка;
 $W = Q_\phi / Q$

Из результатов экспериментальных исследований следует, что на пропускную способность фильтрационной плотины влияют в основном следующие факторы: пористость n_0 ; диаметр частиц d , слагающих тело плотины; входной напор в плотину (глубина воды в лотке) H_0 ; ширина плотины B незначительно влияет на скорость воды в лотке.

На рис.1 приведены графики зависимости удельного фильтрационного расхода плотины от входного напора H_0 для различных диаметров частиц d , слагающих тело плотины, при различных значениях B и L .

Как видно из рисунков, с ростом входного напора H_0 удельный фильтрационный расход растет почти прямолинейно при $B = 33$ см, а при $B = 66; 100$ см зависимость более пологая. При каждом фиксированном значении B, H_0, L, d измерения проводились для трех различных значений общего расхода лотка, чему соответствуют три различные обозначения точек (рис. 1-4). Необходимо отметить, что при ширине плотины $B = 100$ см изменение длины плотины не влияет на изменение удельного расхода. Но наблюдается зависимость удельного фильтрационного расхода от общего расхода лотка. При $B = 33$ см удельный фильтрационный расход зависит только от входного напора H_0 и диаметра частиц d . По нашему мнению, влияние параметров плотины на удельный фильтрационный расход должно изменяться в зависимости от времени, за которое частицы жидкости минуют ширину плотины. Поэтому отсутствие влияния общего расхода лотка на удельный расход фильтрации $B=33$ см и некоторый разброс значений удельных фильтрационных расходов

при $B=66$ см можно объяснить этим обстоятельством. Как видно из рисунка, удельный расход фильтрации растет пропорционально росту диаметра частиц.

Зависимость коэффициента водозабора боковой плотины от скорости воды в лотке показана на рис. 5. Вследствие того, что фильтрующая дамба расположена на боковом отводе лотка, предполагалось значительное влияние на фильтрационный расход скорости потока воды в лотке. Данные, приведенные на рис. 5 в виде зависимости коэффициента водозабора от скорости потока в лотке $W = f(u)$, подтвердили правильность высказанного предположения. С ростом скорости потока в лотке наблюдается снижение коэффициента водозабора. Данный эффект обусловлен, что по нашему мнению, образованием (из-за возрастания скорости потока) вихревых течений, препятствующих фильтрации воды через тело дамбы. Из рис. 5 также следует, что коэффициент водозабора увеличивается с шириной плотины B и диаметром частиц.

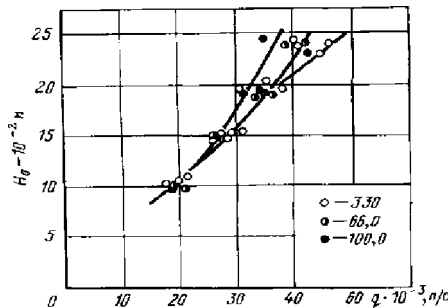


Рис. 1. Зависимость удельного фильтрующего расхода q_ϕ и среднего напора воды H_0

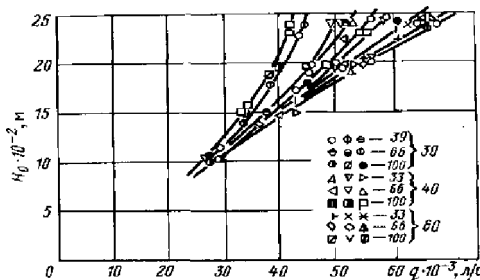


Рис. 2. Зависимость удельного фильтрующего расхода q_ϕ и среднего напора воды H_0

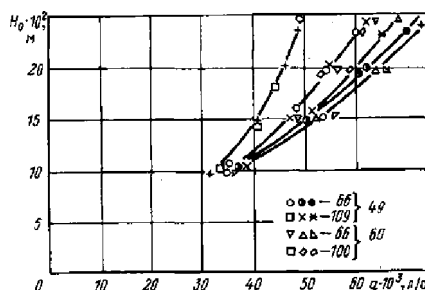


Рис. 3. Зависимость удельного фильтрующего расхода q_ϕ и среднего напора воды H_0

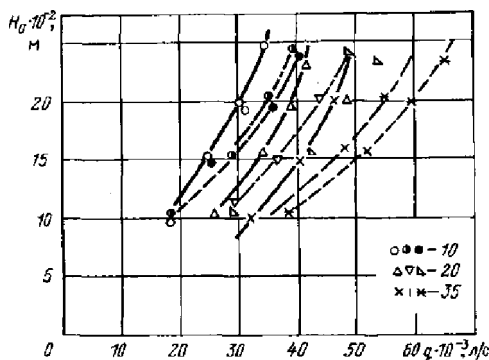


Рис. 4. Зависимость удельного фильтрующего расхода q_ϕ и среднего напора воды H_0

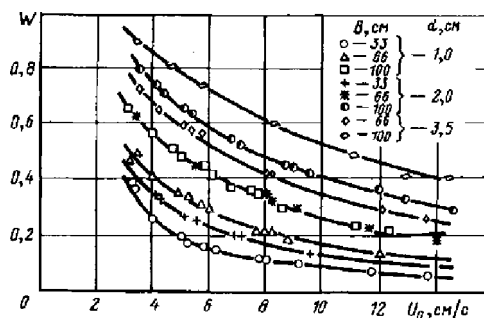


Рис. 5. Влияние средней скорости потока (u_0) в водоводе на коэффициент водозабора фильтрующей плотины (W)

Из экспериментальных данных можно заметить прямо пропорциональную зависимость пористости и удельного фильтрационного расхода (коэффициента водозабора). Таким образом, основными факторами, влияющими на коэффициент водозабора W являются:

- скорость воды в лотке u ;
- ширина плотины B ;
- диаметр частиц d ;
- пористость p_0 .

- Кроме фильтрационного расхода в лабораторных опытах изменялась ширина зоны влияния для выяснения структуры деления потока.

Анализ полигонных данных показывает, что ширина зоны влияния зависит от ширины плотины, скорости воды в лотке и диаметра частиц. Глубина воды в лотке существенного влияния на ширину зоны не оказывает.

В общем смысле под гидравлическим расчетом водозаборных сооружений понимают определение группы неизвестных характеристик процесса по известным или заданным значениям других характеристик и параметров.

В случае боковых фильтрующих водозаборных сооружений в качестве известных и неизвестных характеристик могут быть геометрические размеры водотока и боковой плотины, климатические и гидравлические характеристики водотока, фильтрационный расход плотины, характеристики фильтрующего материала тела плотины, параметры фильтрационного процесса, коэффициент водозабора и зона влияния боковой плотины.

Основная задача расчета боковых фильтрующих плотин состоит в определении фильтрационного расхода ($Q_{\text{ф}}$) или коэффициента водозабора плотины (W), максимальной ширины зоны влияния боковой плотины (B) и режима фильтрации в теле плотины при известных основных параметрах водотока и плотины.

Выводы. 1. Основными факторами, влияющими на пропускную способность плотины, являются: пористость плотины, диаметр частиц, слагающих плотину, входной напор в плотину, ширина плотины.

Влияние средней скорости воды в лотке на расход фильтрации незначительно.

2. Основными факторами, влияющими на коэффициент водозабора являются: скорость воды в лотке, ширина плотины, диаметр частиц, пористость плотины.

3. Ширина зоны влияния зависит от ширины плотины, скорости воды в лотке и от диаметра частиц. Глубина воды в лотке существенно не влияет на ширину зоны влияния.

4. С увеличением диаметра частиц фильтрация в теле плотины становится турбулентной. В то же время зависимость числа Рейнольдса, плотины от Рейнольдса лотка более сильная для больших диаметров частиц, чем для малых.

Литература

1. Бэр Я., Засловски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М.: Мир, 1971.
2. Избаш С. В. Постройка плотин наброской камня в текущую воду. М.: Стройиздат, 1932.
3. Ломизе Г. М. Фильтрация в трещиноватых породах. М.: Стройиздат, 1951.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В ПЛОТИНЕ ПО НЕЛИНЕЙНОМУ ЗАКОНУ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Мавлянов А.С., **Бейсембин К.Р.

*Национальная Академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан
**Таразский Государственный университет им. М.Х. Дулати, г.Тараз, Казахстан
kbeisembin@mail.ru

DETERMINATION OF FACTOR FILTRATION IN A DAM BY A NONLINEAR LAW BASED ON MATHEMATICAL MODELING

*Mavlyanov A.S., **Beysemin K.R.

*National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan
**Taraz State University, named after M.H. Dulati, Taraz, Kazakhstan
kbeisembin@mail.ru

Зависимость эмпирических коэффициентов α, β фильтрации от напора и расхода плотины определяется как образец одномерной модели. Модель фильтрации по закону Прони, обобщающий закон Дарен имеет вид:

$$-\text{grad } H = \alpha \vec{\vartheta} + \beta v \vec{\vartheta} \quad (1)$$

В случае выбора закона Дюпюи-Форхгеймера сложность заключается в подборе коэффициентов α и β в соотношении (1), отвечающим конкретным условиям фильтрационного Процесса. В случае закона Дарси (при $\beta = 0$) коэффициент $\alpha = 1/K$, где K -коэффициент фильтраций. Здесь единственным критерием определения коэффициентов α и β являются теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых можно получить приближённую зависимость коэффициентов α и β от напора и расхода дамбы. В направлении оси Ox рассматриваем постоянную фильтрацию однородной плотины, (рис.1). А также принимаем, что плотина состоит из водонепроницаемого дна.

Смоделирована одномерная стационарная фильтрация в теле однородной фильтрующей дабы в направлении оси Ox , схема которой приведена на рисунке 1.

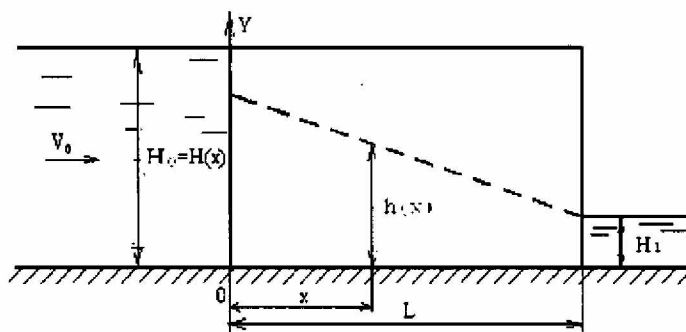


Рисунок 1 - Схема к расчету фильтрации через однородную среду

Длина дамбы в направлении фильтрации (оси x) равна L , а ширина дамбы (в направлении перпендикулярной плоскости чертежа) равна I . Предполагается, что дамба имеет горизонтальное непроницаемое основание и вертикальные стенки. Пусть вода и тело дамбы несжимаемы, где H_0 - глубина воды в верхнем бьефе, H_1 - глубина воды в нижнем бьефе.

Составим математическую модель данной задачи на основе уравнений, считая течение одномерным и стационарным. Тогда областью фильтрации является отрезок $[0, L]$ по оси x с границами $x=0$ и $x=L$. Выберем в качестве плоскости сравнения плоскость Oxy , тогда глубина воды $h(x)$ в точке x дамбы совпадает с гидростатическим напором $H(x)$ в $(x) \in [0, L]$,

Напишем уравнение неразрывности для рассматриваемого процесса:

$$\frac{d}{dx} (\rho, h(x) \cdot V(x) \cdot b) = 0$$

где ρ - плотность жидкости;

$v(x)$ - скорость фильтрации в точке;

$h(x)$ - глубина водоносного слоя в точке x .

Пользуясь тем, что жидкость несжимаема $\rho = const$, $h(x) = H(x)$ и интегрируя последнее уравнение имеем:

$$H(x) \cdot v(x) = const \quad (2)$$

В силу определения скорости фильтрации и сделанного выше предположения о единичной ширине дамбы:

$$H(x) \cdot v(x) = Q(x), \quad (3)$$

где $Q(x)$ - расход жидкости в точке x .
Следовательно, в силу (2) и (3) имеем:

$$Q(x) = const = Q \text{ и } H(x) = \vartheta(x) = Q \quad (4)$$

Подставляя выражение для $v(x)$ из соотношения (1) в закон фильтрации получим:

$$-\frac{dH}{dx} = \alpha \frac{Q}{H} + \beta \frac{Q^2}{H^2}$$

$$\frac{dH(x)}{dx} + \alpha Q \frac{1}{H(x)} + \beta Q^2 \frac{1}{H^2(x)} = 0, \quad 0 < x < L. \quad (5)$$

Соотношение (5) есть искоемое дифференциальное уравнение, описывающее фильтрацию в теле дамбы. К этому уравнению нужно добавить начальное условие:

$$H_{(0)} = H_0 \quad (6)$$

на левой границе области фильтрации.

Таким образом, если задан расход фильтрующей дамбы Q , то искомый напор $H(x)$ является решением задач (5) и (6). Иногда вместо расхода задаётся напор на правой границе области фильтрации:

$$H(L) = H_1 \quad (7)$$

Тогда задача расчёта рассматриваемого безнапорного фильтрационного напора потока равносильна математической задаче определения $H(x)$ и Q из соотношения (5)-(7).

При решении этих задач коэффициенты α и β считаются заданными. При этом они, естественно, зависят от характеристик пористой среды и жидкости.

Решением задачи (5) и (6) или (5)-(7) называется положительная функция $H(x) > 0$, заданная на отрезке $[0, L]$ (и число Q), удовлетворяющая соотношениями (5) и (6) или (5)-(7).

Здесь условие положительности функции $H(x)$ заложено исходя из физической сути задачи, ибо отрицательные значения напора в теле плотины не имеют физического смысла. Исходя из физической сути явлений можем сказать, что если коэффициенты α и β определены правильно в соответствии с конкретными условиями рассматриваемой задачи, то на самом деле должно выполняться ещё одно условие:

$$\frac{dH}{dx} \leq 0$$

Вопрос о существовании решения рассмотренных выше задач на всём интервале $[0, L]$ открыт. Известные общие теоремы гарантируют существование и единственность решения в некоторой окрестности точки $x=0$, пока $H > 0$. Длина этой окрестности определяется коэффициентом Липшица правой части уравнения (5), что никак не связано с длиной дамбы L . Если длина дамбы достаточно большая, то решения рассматриваемых задач могут не существовать. Поэтому для корректности задачи коэффициенты α и β должны ещё зависеть от длины L плотины. Для демонстрации сказанного рассмотрим частный случай задачи (5) и (6), когда $\beta = 0$ (модель на основе закона Дарси). Тогда полученная задача решается аналитически, и её решение имеет вид:

$$H(x) = \sqrt{H_0^2 - 2\alpha Qx}, \quad 0 < x < L \quad (8)$$

Как видно из этой формулы при $L > \frac{H_0^2}{2\alpha Q}$ положительное решение задачи (5) и (6) не существует. Парадоксальная на первый взгляд зависимость α от длины плотины L становится понятной, если мы найдём α из формулы (8):

$$\alpha = \frac{H_0^2 - H^2(x)}{2Qx} \quad (9)$$

Следовательно, а зависит не от длины L , а от координаты x , что правомерно для неоднородных пористых материалов. А если пористая среда является однородной, то напор $H(x)$ в теле плотины меняется таким образом, чтобы правая часть уравнения (9) оставалась постоянной величиной. Из уравнения (9) также следует, что если длина дамбы достаточно большая, то существование положительного по всей длине плотины решения зависит от начального напора H_0 (чем больше L , тем больше должен быть H_0).

Рассматриваем другой частный случай модели, когда $\alpha = 0$. В этом случае задача (5) и (6) также решается аналитически:

$$H=H(x) = \sqrt[3]{H_0^3 - 3\beta Q^2 x}, 0 < x < L \tag{10}$$

Таким же образом можно решить и другие задачи, связанные с процессом фильтрации. Допустим, у нас есть экспериментальные значения напоров $H(x)$ при нескольких значениях x , а также нам известен (экспериментально) расход фильтрующей дамбы Q . Требуется найти коэффициенты α и β в законе (1), так, чтобы соответствующее решение задачи (5) и (6) наилучшим образом аппроксимировало экспериментальные данные.

Итак, пусть $H_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$, значения напоров в точках $x_i, i = 0, 1, 2, \dots, n$, причём, $x_0 = 0, x_n = L$, требуется найти $(\alpha, \beta) \in R^2$ такую, чтобы:

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^n |H_i - H(x_i, \alpha, \beta)| \rightarrow \min \tag{11}$$

где $H(x, \alpha, \beta)$ - решение задачи (5) и (6) соответствующее значениям, фиксированным α, β .

Из изложенного следует, что не для всех точек $(\alpha, \beta) \in DCR^2$ решение задачи (5) и (6) существует. Поэтому определим допустимое множество DCR^2 , в точках которого решение (5) и (6) существует. Считаем, что $(\alpha, \beta) \in DCR^2$, если решение $H(x, \alpha, \beta)$ задачи (5) и (6) существует. Множество D называется допустимым множеством.

Итак, задача состоит в нахождении $(\alpha_0, \beta_0) \in D$ такую, чтобы было $F(\alpha_0, \beta_0) = \min F(\alpha, \beta)$.

Для получения $(\alpha_1, \beta) \in D$ разрешимости поставленной задачи сначала исследуем зависимость $H(x, \alpha, \beta)$ от α и β .

Пусть $(\alpha_1, \beta) \in D, (\alpha_2, \beta) \in D, \alpha_1 > \alpha_2$. Тогда $H(x, \alpha_1, \beta) \leq H(x, \alpha_2, \beta)$ для всех $x \in [0, L]$.

Для доказательства этого обозначим соответствующие решения через $H_1(x) \equiv H(x, \alpha_1, \beta), H_2(x) \equiv H(x, \alpha_2, \beta)$. Тогда по определению решения $H_1(x) > 0, H_2(x) > 0$ для любого $x \in [0, L]$ и

$$\begin{aligned} \frac{dH_1}{dx} + \alpha_1 Q \frac{1}{H_1(x)} + \beta Q^2 \frac{1}{H_1^2(x)} &= 0 \\ \frac{dH_2(x)}{dx} + \alpha_2 Q \frac{1}{H_2(x)} + \beta Q^2 \frac{1}{H_2^2(x)} &= 0 \end{aligned}$$

Умножим первое уравнение на $H_1^2(x)$, а второе $H_2^2(x)$. Вычтем первое уравнение из второго и после элементарных преобразований $H_2^2(x)$ получим:

$$\frac{dH^1}{dx} = P(x)H'(x) + 3QH_1(x)(\alpha_1 - \alpha_2), \tag{12}$$

где

$$P(x) = -\frac{3\alpha_2 Q}{H_1^2(x) + H_1(x)H_2(x) + H_2^2(x)}$$

и в силу начальных условий $H^1(0)=0$.

Тогда решение уравнения (12) дается формулой:

$$H^1(x) = H_2^3(x) - H_1^3(x) = 3Q(\alpha_1 - \alpha_2) \int_0^x H_1(y) e^{\int_y^x P(z) dz} dy > 0$$

для всех $x \in [0, L]$.

Из показанных примеров следует, что если зафиксировать один из параметров α или β а другой параметр растёт, оставаясь в области D то соответствующее решение задачи (5) и (6) убывает с ростом отрезка $[0, L]$. Заметим ещё, что как легко видеть из структуры уравнения (5), если $\alpha > 0, \beta > 0$, то решение задачи (5) и (6) убывает с ростом x , то есть

$$\frac{dH}{dx} \leq 0$$

Иначе говоря, решение $H(x, \alpha, \beta)$ монотонно зависит от α и β . Тогда зафиксировав один из параметров, например β , и изменяя другой, то есть α , можем найти такое его значение, при котором $F(\alpha, \beta)$ достигает своего минимума. Затем, зафиксировав другое значение первого параметра β , найдём соответствующее значение α , доставляющее минимум. Таким образом, в области D существует некая линия $\beta = f(\alpha)$, на которой $F(\alpha, \beta)$ достигает своего минимума при каждом фиксированном β . Далее минимизируя $F(\alpha, \beta)$ на этих линиях находим искомое значение (α, β) .

Для этого, учитывая сказанное в предыдущем пункте, займёмся отысканием (хотя бы приближённо) линии $\beta = f(\alpha)$.

Умножим уравнения (4) и (5) на $H(x)$ и на $H^2(x)$

$$H(x) \frac{dx(x)}{dx} + \alpha Q + \beta Q^2 \frac{1}{H(x)} = 0$$

и

$$H^2(x) \frac{dx(x)}{dx} + \alpha Q H(x) + \beta Q^2 = 0$$

и проинтегрируем полученные уравнения по x от нуля до x с учётом (6)

$$H^2(x) - H_0^2 + 2\alpha Q x + 2\beta Q^2 \int_0^x \frac{dx}{H(x)} = 0 \tag{13}$$

и

$$H^3(x) - H_0^3 + 3\alpha Q \int_0^x H(x) dx + 3\beta Q^2 x = 0 \tag{14}$$

Заметим, что в силу (3.14) $V(x) = Q/H(x)$, и тогда из уравнений (13) и (14) получим:

$$\int_0^x v(x) dx = \frac{H_0^2 - H^2(x)}{2\beta Q} - \frac{\alpha}{\beta} x \tag{15}$$

и

$$\int_0^x H(x) dx = \frac{H_0^3 - H^3(x)}{3\alpha Q} - \frac{\beta Q}{\alpha} x$$

или

$$\frac{1}{x} \int_0^x v(x) dx = \frac{H_0^2 - H^2(x)}{2\beta Q} - \frac{\alpha}{\beta} x$$

и

$$\frac{1}{x} \int_0^x H(x) dx = \frac{H_0^3 - H^3(x)}{3\alpha Q x} - \frac{\beta Q}{\alpha} \tag{16}$$

В левой части (9) стоит среднее значение $V_{cp}(x)$ скорости фильтрации $V(x)$ на интервале $[0, x]$, а в левой части (16) - среднее значение $H_{cp}(x)$ напора $H(x)$ на $[0, x]$.

Учитывая, что любое $x \in [0, L] H(x)V(x) = Q$ примем гипотезу:

$$H_{cp}(x)V_{cp}(x) = Q \tag{17}$$

Подставляя в (15) выражения H_{cp} V_{cp} из (16) и (17) имеем:

$$\left(\frac{H_0^2 - H^2(x)}{\alpha \beta Q x} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \left(\frac{H_0^3 - H^3(x)}{3\alpha \beta Q} - \frac{\beta Q}{\alpha} \right) = Q$$

или после элементарных преобразований приходим к равенству:

$$\frac{3Q^2x}{H_0^3 - H^3(x)} \cdot \beta + \frac{2Qx}{H_0^2 - H^2(x)} \alpha = 1 \quad (18)$$

Таким образом, в задачах (5) и (6) α и β между собой связано уравнением (18). Это уравнение, нужно отметить, приближённое, так как оно получено из гипотезы (17), которая выполняется не всегда удовлетворительно. Тем не менее, в некоторых частных случаях оно дает точное решение. Теперь, для определения α и β , отвечающих экспериментальным данным достаточно взять любые две данные $x_1, x_2, H(x_1), H(x_2)$ и подставляя их в уравнение (18) получим два уравнения относительно α и β . Рекомендуется в качестве одного из данных взять $x_n=L$ и $H_n=H(L)$, то есть конечную точку фильтрации. Здесь и появляется упомянутая выше зависимость α и β от L . Тогда формула (18) примет более конкретный вид:

$$\frac{3Q^2L}{H_0^3 - H_n^3} \beta + \frac{2QL}{H_0^2 - H_n^2} \alpha = 1. \quad (19)$$

Вычисление по формуле (18) в частном случае, когда $\alpha = 0$, далее достоверные результаты, подтверждающие экспериментальные исследования.

Литература

1. Арье А.Г. Физические основы фильтрации подземных вод. Москва, «Недра»
2. Гавич И.К. Гидродинамика. Москва, «Недра», 1983 г.
3. Бер Я., Заславский Д., Тирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. Москва, «Мир», 1971 г.
4. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. Москва, «Недра», 1983 г.
5. Полубаринова-Кочина П.Н. Теория движения грунтовых вод. Москва, «Наука», 1977 г.