

На правах рукописи



Заборова Дарья Дмитриевна

**МЕТОД РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В
ОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЕРЕМЫЧКАХ**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель

Петриченко Михаил Романович

профессор, доктор технических наук

Локтионова Елена Анатольевна

доцент, кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Анискин Николай Алексеевич

профессор, доктор технических наук

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего

образования "Национальный

исследовательский Московский

государственный строительный университет"

Лопатина Маргарита Геннадьевна

кандидат технических наук

Акционерное общество «Всероссийский

научно-исследовательский институт

гидротехники имени Б.Е. Веденеева»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Атомэнергопроект»

Санкт-Петербургский филиал – «Санкт-

Петербургский проектный институт»

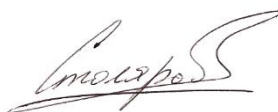
Защита состоится «14» февраля 2023 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.1.35 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Учёный секретарь диссертационного совета У.2.1.1.35

кандидат технических наук



Столяров О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Фильтрационные задачи занимают особое место во многих областях строительства, промышленности и сельского хозяйства. Возведение оснований и фундаментов, строительство грунтовых плотин, перемычек и других гидротехнических объектов, орошение и осушение земель, накопление подземных вод и другие потребности практики требуют обязательных фильтрационных расчетов. Зачастую при проведении комплекса строительных работ необходимо возводить временные напорные сооружения – перемычки, которые защищают конструкции от воздействия потока воды и не допускают подтопления строительной площадки.

Основное влияние на устойчивость таких перемычек оказывают фильтрационные силы, действующие на тело перемычки. Учет воздействия фильтрационного потока необходим при проектировании гидроэнергетических и гидромелиоративных сооружений (зданий ГЭС, бетонных и земляных плотин, судоходных шлюзов, береговых устоев, водоспусков и др.). Неправильные расчеты могут приводить к потере устойчивости сооружений в процессе их эксплуатации, и даже к разрушению. Фильтрация воды влияет на условия строительства; определяет выбор глубины заложения фундамента и технологию возведения сооружений. Дальнейшая эксплуатация техногенных сооружений также находится под постоянным воздействием фильтрационного потока, что диктует высокие требования к корректности фильтрационных расчетов. Важным фактором утраты устойчивости перемычки является высокое положение отметки высачивания фильтрационного потока.

Участок высачивания (высота промежутка высачивания) определяет размер выходного сечения фильтрационного потока, истекающего из тела перемычки. В условиях, когда перемычка выполнена из сыпучего материала, ее низовая грань может подвергаться «морозному пучению» с последующим нарушением устойчивости перемычки. Неплотность укладки грунта и неправильное определение его сухого объема приводит к неконтролируемой осадке сооружения и к суффозии грунта из тела перемычки. На реальных сооружениях процесс установления депрессионной кривой может занимать значительные промежутки времени. В этот период нестационарной фильтрации перемычка наиболее неустойчива, поэтому важно определять мгновенные положения депрессионных кривых, а также рассчитывать время полного установления депрессионной поверхности.

Несмотря на значительный объем опубликованных исследований по нестационарной фильтрации, существующие на сегодняшний день методы и алгоритмы по определению отметки высачивания проработаны недостаточно. В связи с изложенным, моделирование нестационарного фильтрационного потока в водоподпорных грунтовых сооружениях представляется актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Основоположниками теории фильтрации являются: А. Дарси, Ж.В. Буссинеск, В. Дюпюи. Большой вклад в развитие фильтрационных расчетов был внесен представителями отечественной гидромеханической школы фильтрации: Н.Е. Жуковским, Л.С. Лейбензоном, Н.Н. Павловским, С.А. Христиановичем, П.Я. Полубариновой-Кочиной, Р.Р. Чугаевым, Б.Б. Девисоном, И.А. Чарным. Современные исследования в области фильтрации отражены в работах К.Н. Анахаева, Н.А. Анискина, Э.Н. Береславского, В.Н. Бухарцева, М.Р. Петриченко, С.В. Сольского, М.Г. Лопатиной, В.А. Подольского, А.В. Ищенко.

Нестационарные задачи фильтрации рассматривались в работах П.Я. Полубариновой-Кочиной, С.Н. Нумерова, В.И. Аравина, Г.И. Баренблатта, В.М. Ентова, В.М. Рыжика, В.И. Сологаева, В.А. Подольского, Т. Чэпмана, М. Маскета, В.В. Кадета и других авторов.

Необходимо отметить, что в связи с потребностями практики произошло дифференцирование работ в области фильтрации. Задачи, связанные с движением углеводородов, относятся к т.н. «подземной гидромеханике»; задачи школы Павловского – Полубариновой-Кочиной – к гидротехнике и мелиорации; географические задачи – к гидрогеологии и, отчасти, к гидрологии суши (М.А. Великанов, Н.К. Гирицкий). Сильная дифференциация задач привела к разрыву методов их решения.

Разработанное П.Я. Полубариновой-Кочиной известное аналитическое решение для безнапорной фильтрации в прямоугольной перемычке во второй половине 20-го века, было рассмотрено, скорректировано и подтверждено многими зарубежными авторами – С. W.Cryer, Т. Ozis, E. Bruch, J.M. Aitchison и др.

Нестационарным задачам фильтрации посвящена небольшая глава в монографии П.Я. Полубариновой-Кочиной, причем ряд задач решен в линеаризованной постановке, например, задача о фильтрации при колебании уровня воды в одном из бьефов. В настоящее время актуализация этой задачи обусловлена проектированием грунтовых плотин для гидроаккумулирующих станций.

Экспериментальные исследования фильтрации в России начаты В.С. Лукьяновым, применившим так называемый «интегратор Лукьянова», предназначенный для определения линий тока и эпюр скорости в пористой среде. Для моделирования движения жидкости в вертикальной плоскости используется узкий щелевой лоток шириной на порядок меньше его длины. Аналогичные экспериментальные методы применялись Д.И. Тейлором, М. Маскетом и научными подразделениями нефтяных компаний. В Московском нефтяном институте работы по фильтрации велись также с начала 30-х годов Л.С. Лейбензоном, И.А. Чарным. В настоящее время эти работы проводятся на кафедре подземной гидромеханики под руководством В.В. Кадета. Также активными исследованиями в области фильтрации, в том числе в области обеспечения надежности и безопасности грунтовых плотин, занимаются

научные коллективы во ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева и в Московском государственном университете на кафедре Гидротехнического строительства.

В современных работах иностранных авторов K.K. Lee, D.I. Leap, M. Billstein, P.H. Mitchell, M.E. Harr, J.S.P. Cabral, C.C. Hsiao основной акцент направлен на решение фильтрационных задач (определение депрессионной кривой, высоты промежутка высачивания, фильтрационного расхода) методами МКЭ, МКО и МГЭ. Таким образом, строятся так называемые «слабые» решения предельной задачи для уравнения Лапласа. Проверки решений производятся по результатам расчетов, опубликованных П. Я. Полубариновой-Кочиной, которые рассматриваются как эталонные.

Объектом исследования являются однородные грунтовые перемычки.

Предметом исследования – параметры нестационарного фильтрационного потока в однородных грунтовых перемычках.

Цели и задачи. Целью работы является разработка инженерного метода расчета нестационарной фильтрации через однородную грунтовую перемычку.

Для достижения данной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ современного состояния изученности нестационарного фильтрационного потока;
2. Предложена оригинальная математическая модель неустановившейся фильтрации в однородном грунте;
3. Создан метод упрощенного расчета нестационарных фильтрационных потоков;
4. Проведено физическое и численное моделирование процесса фильтрации в однородных грунтовых перемычках;
5. Верифицированы результаты исследования.

Научная новизна. Разработан, обоснован и экспериментально проверен новый метод решения задачи нестационарной фильтрации. Получены расчетные зависимости для определения фильтрационных расходов и промежутков высачивания в прямоугольной однородной перемычке. Произведена приближенная оценка объемов сухого и водонасыщенного грунта в условиях нестационарной фильтрации.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в разработке оригинального метода решения, позволяющего упростить существующие методы расчета нестационарных фильтрационных потоков.

Практическая значимость заключается в применении разработанных вычислительных приемов к фильтрационным расчетам перемычек в рамках следующих задач:

- определение объемов насыщенного и ненасыщенного грунта, скорости изменения этих объемов, определение мгновенных и финальных положений депрессионных кривых;

- определение высоты промежутка высачивания и динамики его изменения во времени.

Методология и методы исследования. Для решения задачи использован математический подход, позволяющий заменить нелинейное уравнение Буссинеска интегральными соотношениями; экспериментальные исследования определения фильтрационных характеристик коротких и длинных однородных перемычек, а также численные методы расчета, полученные в программном комплексе Plaxis.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод определения мгновенного положения депрессионной кривой и промежутка высачивания (математическая модель);

2. Инженерные номограммы для определения расхода и промежутка высачивания;

3. Алгоритм упрощенного расчета параметров нестационарного фильтрационного потока.

Степень достоверности и обоснованность результатов аналитических расчетов подтверждаются их верификацией с расчетами депрессионных кривых, промежутков высачивания и расходов, опубликованными другими авторами, результатами сопоставления с численными расчетами в программном комплексе Plaxis, и с опытными данными, полученными автором в гидравлической лаборатории университета.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации и результаты исследований были представлены автором на международных и российских научно-практических конференциях в 2016-2022 гг.: SPbWOSCE-2016. SMART City / Saint Petersburg, November (2016); International Conference on Engineering Sciences and Technologies, EsaT, Словакия (2016, 2018); Научный форум «Неделя науки СПбПУ» (2017); Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство» (EECE-2019), г. Санкт-Петербург (2019); Международный симпозиум World Cities World Class University Network Symposium (2017, 2019); Международная конференция “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO-2020); Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (2019, 2020, 2022).

Результаты диссертационного исследования нашли практическое применение в фильтрационных расчетах временной перемычки для осушения акватории яхт-клуба в г. Санкт-Петербург, базирующегося в порту «Геркулес» по адресу: Санкт-Петербург, Береговая улица 19. Факт использования материалов диссертации подтвержден справкой о применении расчетов, выполненных в интересах компании “ООО ТЮФ Интернациональ Рус”, проводившей технический надзор на строительном объекте.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, включая 5 статей в журналах, входящих в «Перечень периодических научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования

РФ», 5 статей в журналах, индексируемых в базах данных WoS, Scopus, а также 1 работа в сборнике тезисов докладов конференции уровня РИНЦ.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, 1 приложения, заключения, списка литературы из 101 наименования. Диссертационная работа изложена на 134 страницах машинописного текста, в том числе, 67 рисунков, 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описаны объект и предмет, методологическая база исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы, описаны различные методы и цели фильтрационных расчетов. Рассмотрена нестационарная фильтрация, описываемая уравнением Буссинеска:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{m} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где h – глубина фильтрационного потока;

k – коэффициент фильтрации грунта;

m – пористость грунта;

x – продольная координата.

Уравнение (1) выведено для случая горизонтального водоупора и отсутствии инфильтрации (или испарения), а также с учетом двух допущений: силы инерции пренебрежимо малы; горизонтальные составляющие скорости фильтрации не изменяются по сечению. Вследствие того, что уравнение Буссинеска является нелинейным, его решение связано с большими математическими трудностями. Поэтому существующие методы расчета в основном связаны с его линеаризацией, что дает осреднение по глубине. В данной работе используется иной метод, заменяющий уравнение Буссинеска интегральными соотношениями.

Во **второй главе** рассматривается безнапорная фильтрация через прямоугольную однородную грунтовую переемычку. Предполагается следующая постановка задачи (рисунок 1). В начальный момент времени глубина фильтрационного потока постоянна и равна H . Затем в сечении $x=0$ происходит мгновенное (быстрое) снижение уровня воды от значения $h=H$ до значения $h=h_e$. Депрессионная кривая «отслеживает» падение уровня воды в нижнем бьефе, постепенно снижаясь в точке выклинивания с отметки $h(0,0)=H$ до некоторого значения $h(t,0)=h_0(t)$, $h_e < h_0(t) < H$. Левый конец депрессионной кривой (точка выклинивания) падает вниз, а правый конец движется по ординате $z=H$ в сторону верхнего бьефа. Падение уровня воды в пористом теле отстает от падения уровня в нижнем бьефе, поэтому кривая депрессии в точке $x=0$, $z=h_0:=h(t,0) \geq 0$ отрывается от уреза воды. Образуется так называемый «промежуток высачивания» высотой δh .

Для одной и той же перемычки увеличение глубины воды в верхнем бьефе приводит к относительному уменьшению ее длины и увеличению высоты промежутка высачивания. Наоборот, снижение уровня воды «удлиняет» перемычку и уменьшает промежуток высачивания.

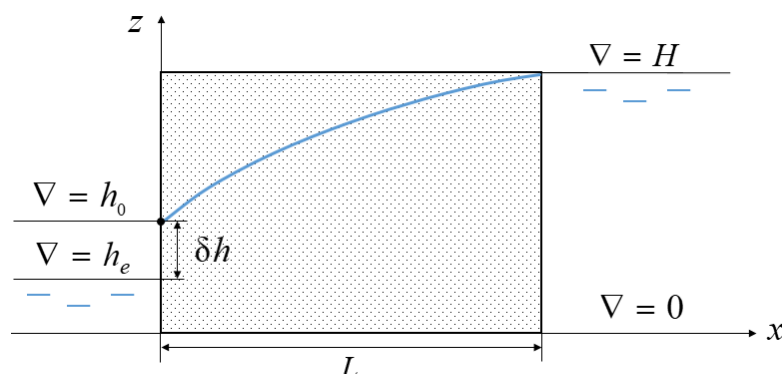


Рисунок 1 – Постановка задачи фильтрации

Исходное уравнение Буссинеска приводится к безразмерному виду:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial s} \left(u \frac{\partial u}{\partial s} \right). \quad (2)$$

Уравнение решается с учетом следующих обозначений:

$$\tau := \frac{kt}{mH} > 0, \quad s := x/H > 0, \quad u := h/H, \quad (3)$$

$$u_e := h_e/H, \quad u_0 := h_0/H, \quad \theta := q/(kH),$$

где τ, s, u, θ – соответственно безразмерные время, координата, глубина, фильтрационный расход;

q – удельный фильтрационный расход.

Предельные условия для уравнения (2) записываются следующим образом:

$$u(\tau, 0) = u_0(\tau, 0), \quad u(0, s) = 1. \quad (4)$$

Вводятся допущения: 1) расход воды через сечение $s=\Lambda$ (где $\Lambda = L/H$ – безразмерная длина перемычки, L – длина перемычки, м) совпадает с расходом по формуле Дюпюи, который в принятых обозначениях равен $\theta_D = \frac{1-u_e^2}{2\Lambda}$;

2) скорость падения депрессионной кривой, $-\partial u / \partial \tau$, монотонно уменьшается от нижнего бьефа к верхнему бьефу по степенному закону: $-\partial u / \partial \tau = c(1-s/\lambda)^n$, где c – скорость падения точки выклинивания в нижний бьеф, $c = (-du/d\tau) \geq 0$; λ – горизонтальная проекция мгновенной депрессионной кривой, $0 \leq \lambda \leq \Lambda$; $n = -\lambda/\Lambda$ – числовой параметр.

Вводя безразмерный расход θ в уравнение (2) и интегрируя его, получаем выражение

$$\theta = \frac{1-u_0^2}{2\Lambda}, \quad (5)$$

находим мгновенную конфигурацию депрессионной кривой

$$u = \sqrt{u_0^2 + (1 - u_0^2) \left(1 - (1 - s/\lambda)^{2-\lambda/\Lambda}\right)} \quad (6)$$

и высоту промежутка высачивания в безразмерном виде:

$$u_0 = u_e + (1 - u_e) \exp(-\lambda), \quad \Delta = u_0 - u_e = (1 - u_e) \exp(-\lambda). \quad (7)$$

Депрессионные кривые, построенные по формуле (6) для перемычек $\Lambda = L/H = 0,8; 1$ представлены на рисунке 2. Для перемычек длиной $\Lambda = L/H = 1,33; 2; 2,53$ результаты приведены в главе 2 диссертации.

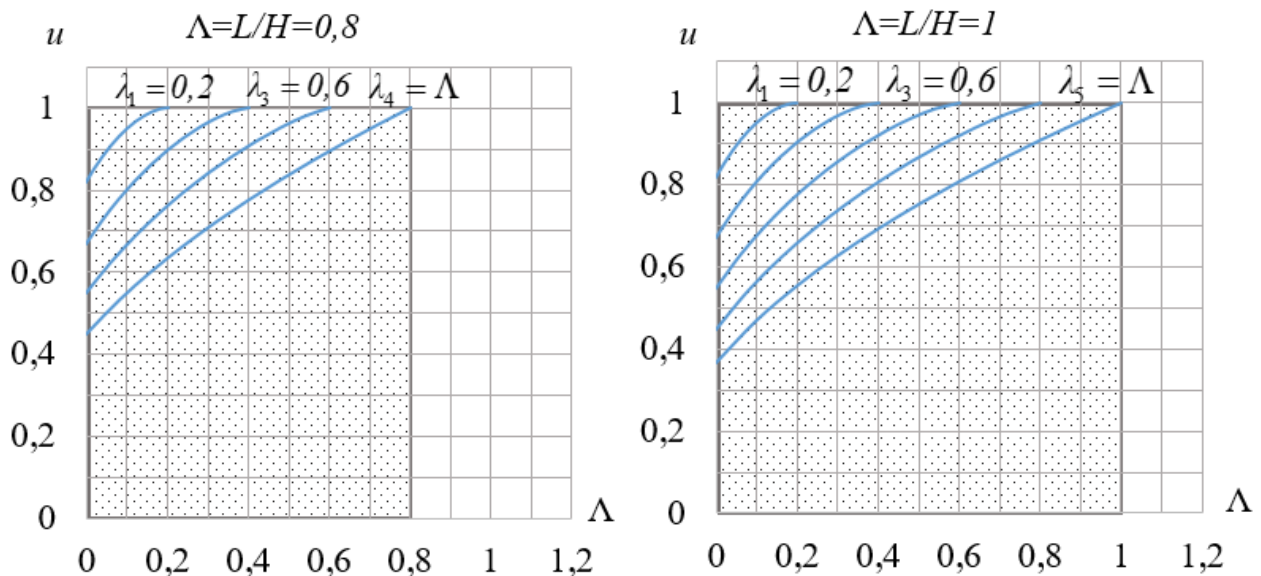


Рисунок 2 – Кривые депрессии для перемычек $\Lambda = L/H = 0,8; 1$

Таким образом, результаты, полученные по формулам (5) и (6), можно представить в виде двух инженерных номограмм, позволяющих быстро определить изменение расхода и промежутка высачивания (рисунок 3).

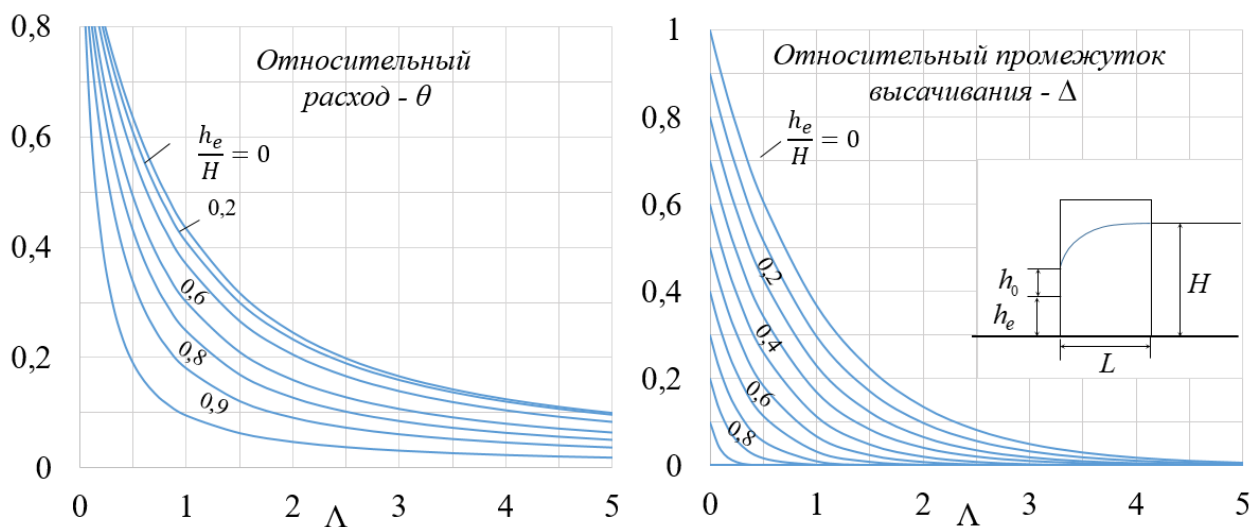


Рисунок 3 – Зависимости $\theta = f(\Lambda)$ и $\Delta = f(\Lambda)$

На основании математической модели разработан алгоритм расчета параметров нестационарного фильтрационного потока. Так, задаваясь длиной перемычки (L) и уровнями воды в верхнем (H) и нижнем бьефах (h_e), можно рассчитать падение депрессионной кривой и фильтрационный расход во времени (рисунок 4).

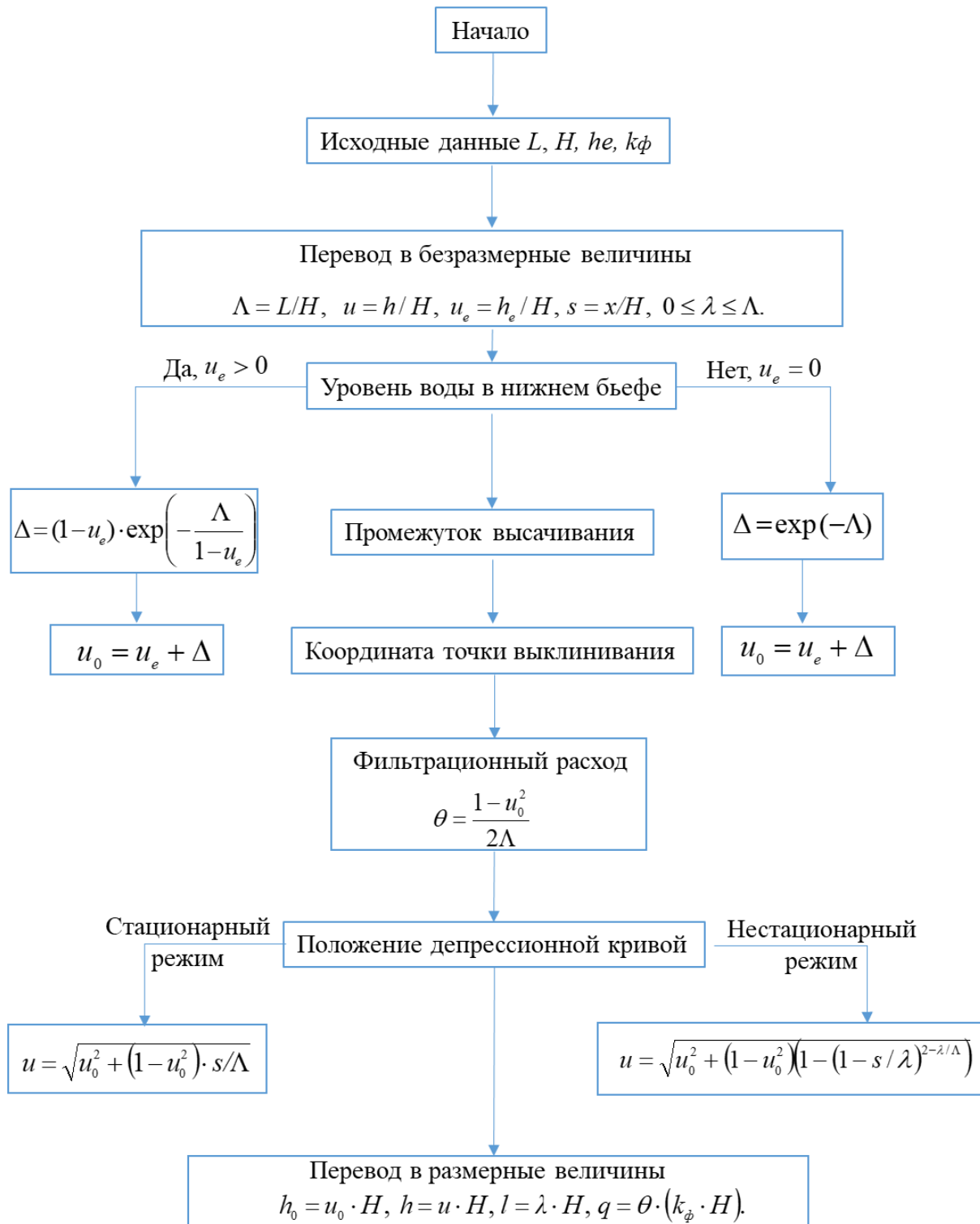


Рисунок 4 – Блок схема для вычисления фильтрационных характеристик потока

В третьей главе определяются мгновенные и стационарные расходы для перемычек различной формы.

Экспериментальный метод решения задач фильтрации в перемычках основывался на моделировании в лабораторных условиях. В лотке из поликарбоната была устроена однородная перемычка из среднезернистого песка с коэффициентом фильтрации $k=2$ м/сут. Устойчивость вертикальных откосов обеспечивалась сетчатыми перегородками, выполненными из двух перфорированных листов с диаметром ячеек 4 мм (рисунок 5). Уровень верхнего бьефа устанавливался на отметках $H=25, 20, 15, 10$ см. Измерение расхода производилось в нижнем бьефе объемным способом при указанных уровнях воды в верхнем бьефе каждые 100 мл.

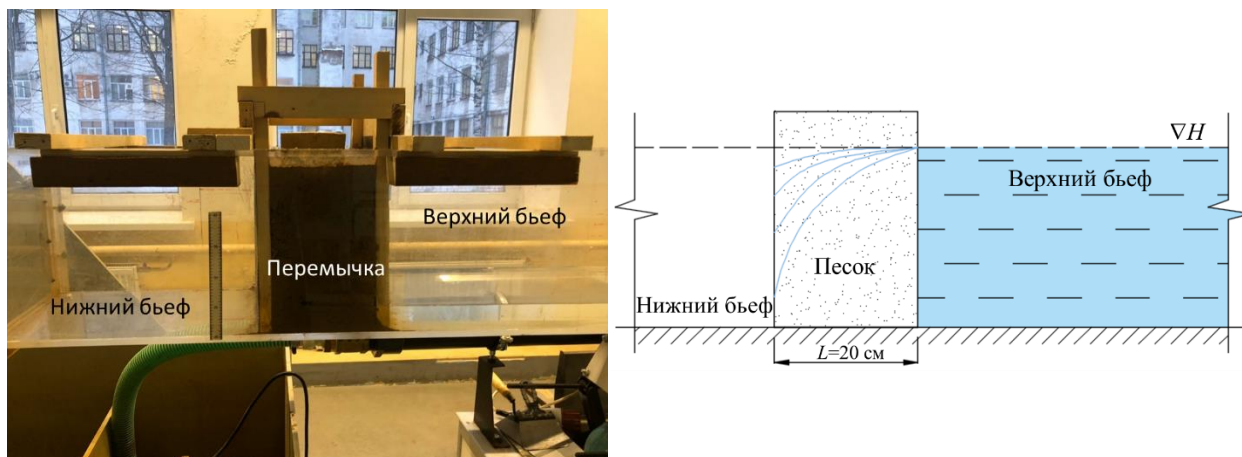


Рисунок 5 – Экспериментальная установка и схема течения: прямоугольная перемычка

Эксперимент проводился для двух перемычек: прямоугольной, с размерами 20x25,5x30 см, и трапецидальной, с размерами 50x25,5x30 см (где 50 см – длина подошвы). При «резком» осушении нижнего бьефа до нулевой отметки производилось измерение мгновенных расходов объемным способом до полного установления стационарного режима (уровень верхнего бьефа при этом поддерживался на постоянной отметке). Результаты измерений представлены на рисунке 6, где q_n – мгновенный расход, q_{st} – установившийся расход, t_n – мгновенные времена, t_{st} – время установления расхода.

Повторяемость опытов для каждого УВБ равнялась трем. Относительная погрешность измерений находилась в пределах 7,2-16,5%.

Как видно из рисунка 6, чем длиннее перемычка (чем больше отношение L/H), тем больше расход в начальный момент времени отличается от стационарного. В прямоугольной «короткой» перемычке ($L/H=0,8$) время установления стационарного режима фильтрации составило 128 мин, в длинной перемычке ($L/H=2$) – 194 мин. Такая же закономерность наблюдалась и в перемычке трапецидальной формы.

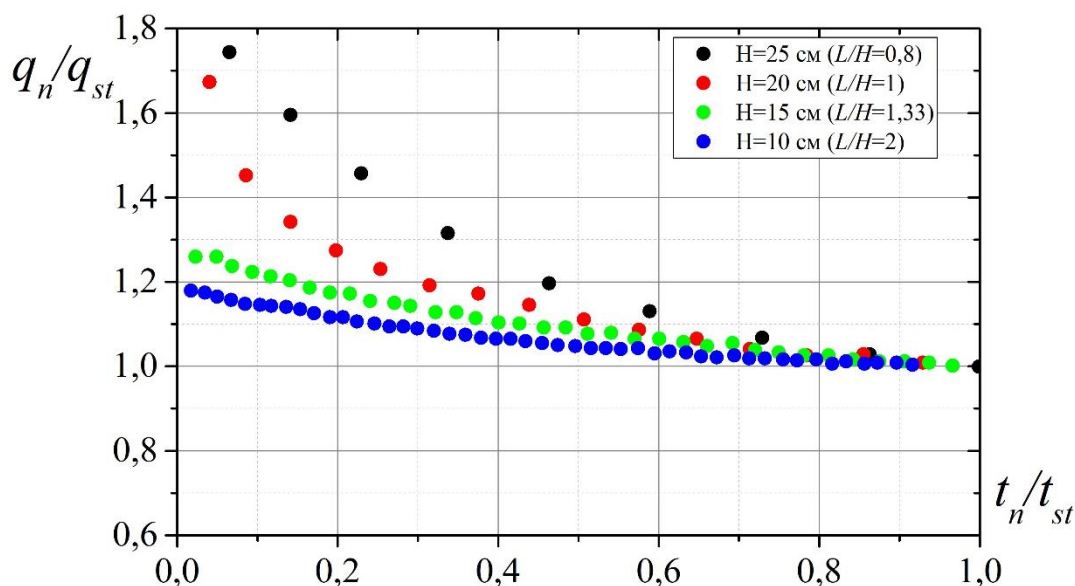


Рисунок 6 – Изменение относительного расхода во времени для прямоугольной перемычки длиной $L=20$ см

Сопоставление результатов расчета стационарного расхода по различным методикам (по данным П.Я. Полубариновой-Кочиной, по формуле Дюпюи, по предложенной математической модели, по результатам расчета в программном комплексе Plaxis, по измерениям на лабораторной установке) представлено в таблице 1. Погрешность определения расхода различными способами не превосходит 20-30%.

Таблица 1 – Сравнение установившихся расходов

УББ	$H=25$ см	$H=20$ см	$H=15$ см	$H=10$ см
q опытное, $\text{см}^2/\text{с}$	0,027	0,018	0,0080	0,004
q расчетное (модель), $\text{см}^2/\text{с}$	0,025	0,017	0,010	0,005
q по ф. Дюпюи, $\text{см}^2/\text{с}$	0,031	0,020	0,011	0,005
q по графикам Кочиной, $\text{см}^2/\text{с}$	0,032	0,020	0,010	0,005
q Plaxis, $\text{см}^2/\text{с}$	0,034	0,022	0,0097	0,005

Для проверки линейного закона фильтрации во всей области движения было вычислено число Рейнольдса для модели, которое не превысило критического значения; полученные величины $R_{ed} < 1$.

Моделирование безнапорной нестационарной фильтрации в перемычке с дренажем производилось в лотке шириной 5 см, заполненном тем же грунтом. Уплотнение грунта происходило послойно, с целью его однородности и удаления воздуха. Длина перемычки составляла $L=20$ см, высота – 30 см. Для понижения расхода через нижний бьеф путем перехвата фильтрационного потока, на расстоянии $0,1L$ от нижнего бьефа было выполнено дренажное отверстие диаметром $d=1,5$ см (рисунок 7).

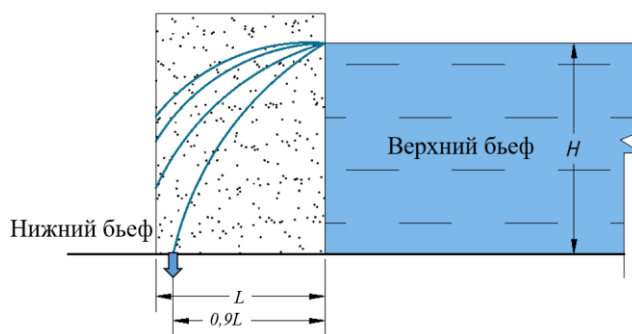
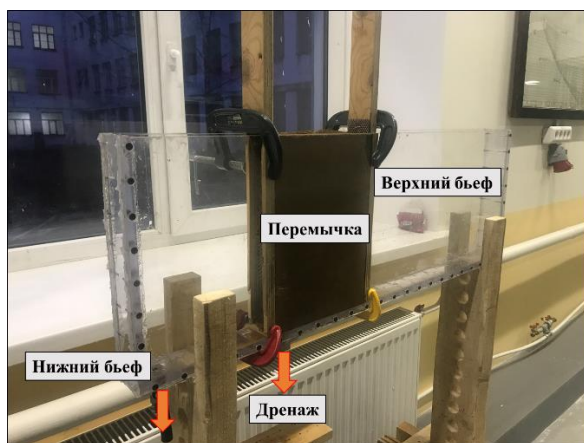


Рисунок 7 – Экспериментальная установка и схема течения через перемычку с дренажем

Изменение относительного расхода через дренаж в зависимости от напора H представлено в таблице 2, где q_3 – расход через дренаж, q_2 – расход через нижний бьеф, (q_2+q_3) – полный расход через перемычку.

Таблица 2 – Относительный расход через дренаж

H , см	25	20	15	10	5
$q_3/(q_2+q_3)$, %	20,2	22,6	36	42	100

Полученные результаты для установившегося режима фильтрации позволяют сделать следующие выводы: чем длиннее перемычка, тем эффективнее работа дренажа при его неизменном положении. То есть, при уменьшении напора в верхнем бьефе H и неизменном положении дренажа эффективность перехвата фильтрационного потока увеличивается. В короткой перемычке ($L/H=0,8$) точечный дренаж перехватывает примерно 1/5 фильтрационного расхода. Доля перехватываемого дренажом расхода увеличивается до 100% при увеличении длины перемычки ($L/H=4$).

Четвертая глава посвящена определению мгновенных конфигураций депрессионных кривых и промежутков высачивания. На экспериментальной установке (рисунок 8) на высоте 5 см от дна было смонтировано пять пьезометров на расстоянии 4 см друг от друга. Уровень воды в нижнем бьефе оставался постоянным и был равен 10 см. Уровень воды в верхнем бьефе менялся от 25 см до 15 см. Мгновенные депрессионные кривые для уровня верхнего бьефа $H=25$ см представлены на рисунке 8. Точка выклинивания фильтрационного потока $h_0=12$ см. Время установления депрессионной кривой $T=170$ с. Результаты были зафиксированы с помощью видеосъемки.

Опыты показали, что с увеличением относительной длины перемычки L высота промежутка высачивания уменьшается, а время установления депрессионной кривой увеличивается. Помимо этого, чем длиннее перемычка, тем меньше скорость падения депрессионной кривой.

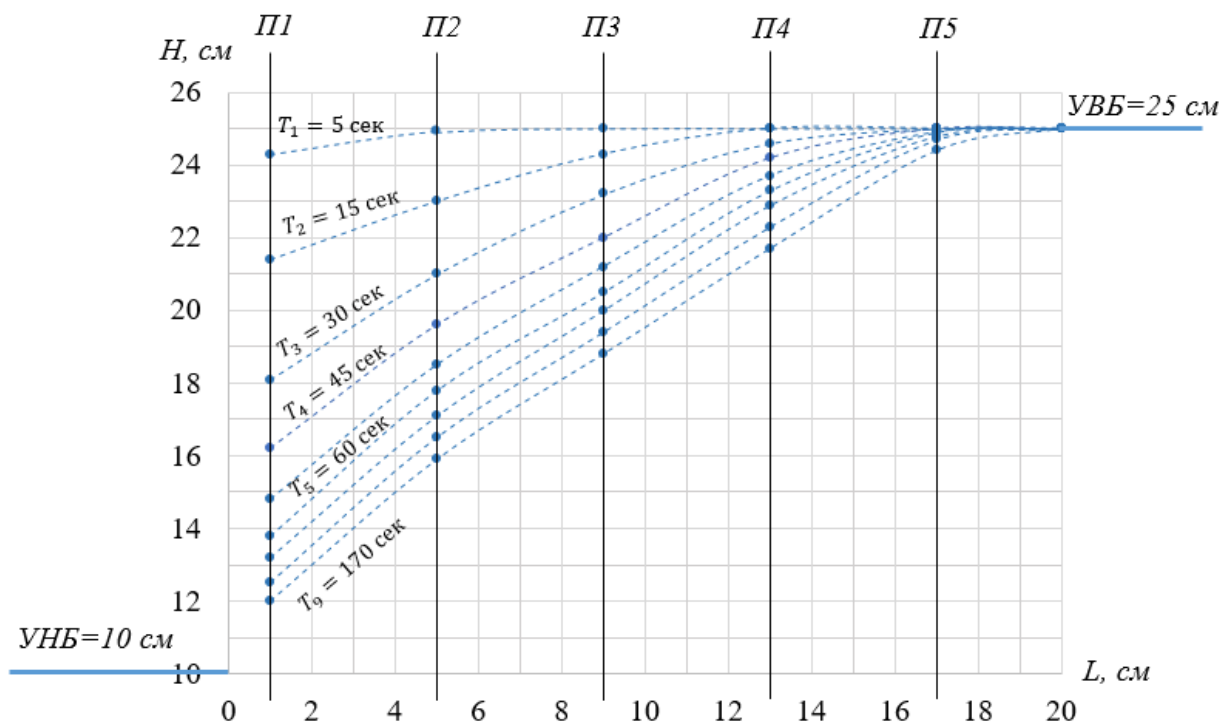


Рисунок 8 – Мгновенные депрессионные кривые для перегородки $\Lambda=L/H=0,8$

Результаты расчета безразмерной высоты промежутка высачивания в зависимости от относительной длины перегородки Λ при разных уровнях нижнего бьефа u_e были сопоставлены с графиками П.Я. Полубариновой-Кочиной (рисунок 9).

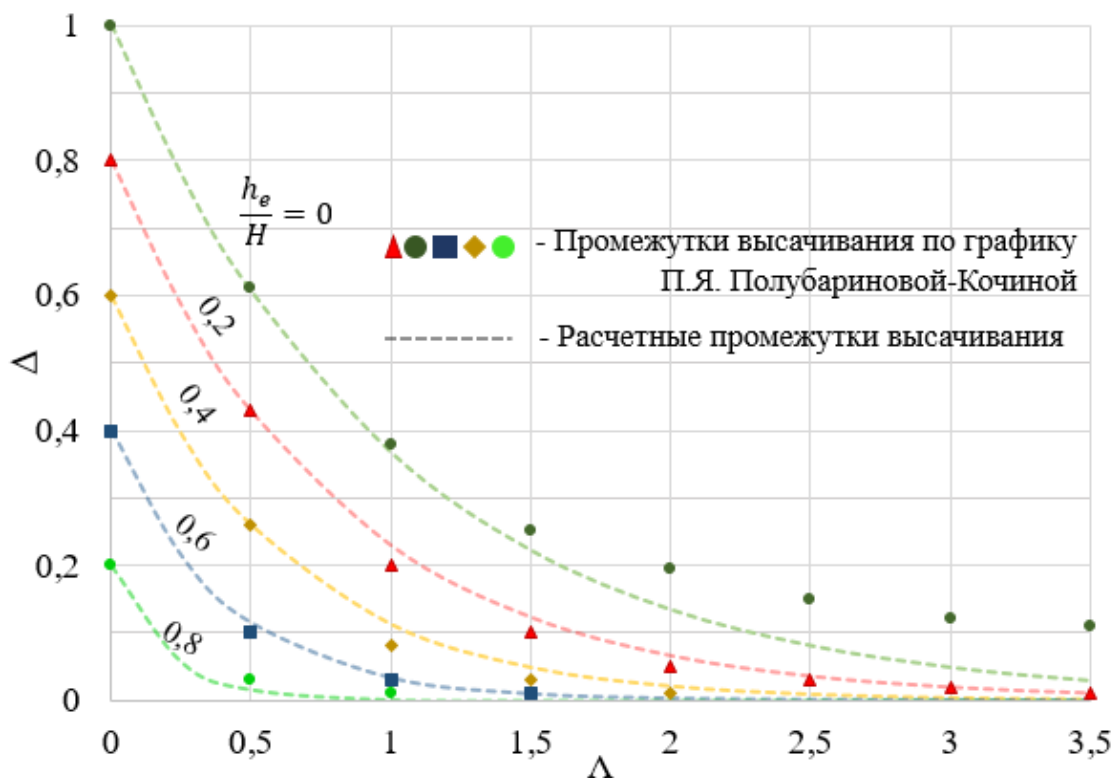


Рисунок 9 – Зависимость Δ от h_e/H

Очевидно, что при $\Lambda > 3$ величина высоты промежутка высачивания исчезающе мала при любом $0 < u_e < 1$. При ненулевых глубинах в нижнем бьефе, т.е. когда $h_e > 0$, расчетные значения промежутка высачивания коррелируют с результатами, полученными П.Я. Полубариновой-Кочиной. Однако, при сухом нижнем бьефе, т.е. когда $h_e/H = 0$, при длине перемычки больше $\Lambda > 1,5$, имеется заметное расхождение с результатами П.Я.Полубариновой-Кочиной (рисунок 9).

Для верификации математической модели в программном комплексе Plaxis был произведен фильтрационный расчет однородных перемычек с целью определения промежутка высачивания и формы депрессионной кривой при «сухом» и «мокроем» нижнем бьефе ($h_e/H = 0$, $h_e/H \neq 0$). Расчеты производились с использованием режима «flow only» для установившегося потока грунтовых вод. Грунт моделировался как линейно-упругий, состоящий из песка средней крупности с коэффициентом фильтрации $k = 2$ м/сут и коэффициентом пористости $m = 0,6$. Результаты для перемычек $\Lambda = L/H = 0,8$; $1,33$ представлены на рисунке 10.

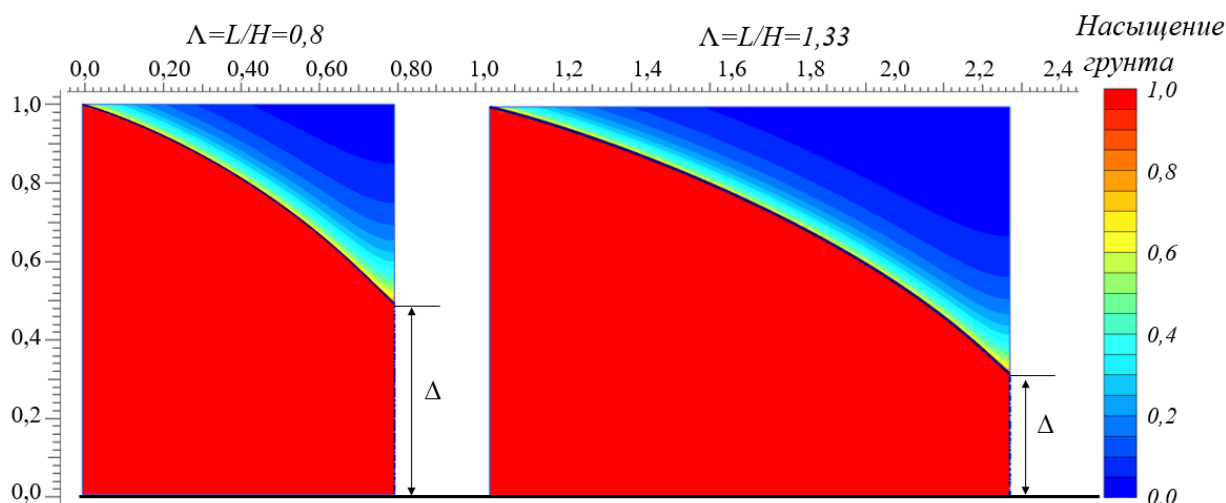


Рисунок 10 – Установившийся промежуток высачивания при УНБ=0

Сходимость результатов численного расчета и литературных значений увеличивается с уменьшением относительной длины перемычки. Plaxis – моделирование завышает высоту Δ промежутка высачивания и, следовательно, объем водонасыщенного грунта (Таблица 3).

Таблица 3 – Высота промежутка высачивания Δ при «сухом» нижнем бьефе

$\Lambda = L/H$	0,8	1	1,33	2
Δ Plaxis	0,49	0,41	0,31	0,21
Δ расчетный (модель)	0,45	0,37	0,26	0,13
Δ по П.Я. Кочиной	0,45	0,37	0,27	0,19
Δ по К.Н. Анахаеву	0,46	0,37	0,28	0,18

П.Я. Полубарновой-Кочиной был использован метод аналитической теории дифференциальных уравнений, тогда как К.Н. Анахаев получил

формулы для определения основных фильтрационных характеристик на основе теоретических исследований и данных моделирования по методу ЭГДА.

При наличии воды в нижнем бьефе значения, полученные с помощью математической модели, немного завышены по сравнению с остальными методами (таблица 4). Однако расхождение в результатах не превышает 15%.

Таблица 4 – Координата точки выклинивания депрессионной кривой (h_0 , см) при «мокроем» нижнем бьефе

УВБ	$H=25$ см	$H=20$ см	$H=15$ см
расчетная (модель)	14,0	11,4	10,15
по П.Я. Кочиной	13,3	11,0	10,15
по К.Н. Анахаеву	13,2	11,0	10,07
Plaxis	13,1	10,8	10,15
опыт (экспер.)	12,0	11,0	10,30

Форма установившейся депрессионной кривой была получена П.Я. Полубариновой-Кочиной методом конформных преобразований и найдена с помощью нелинейной системы уравнений. Позже, авторами У. Хортунгом и Т. Крюгером были даны точные численные значения для двух случаев:

- при «сухом» нижнем бьефе, $\Lambda (L/H)=1$, $u_e=0$, $u=1$;
- при уровне воды в нижнем бьефе $u_e=0,5$, $\Lambda (L/H)=0,5$, $u=1$. Результаты сравнения формы депрессионной кривой представлены на рисунке 11. Расхождение значений координат находится в пределах 2-8%.

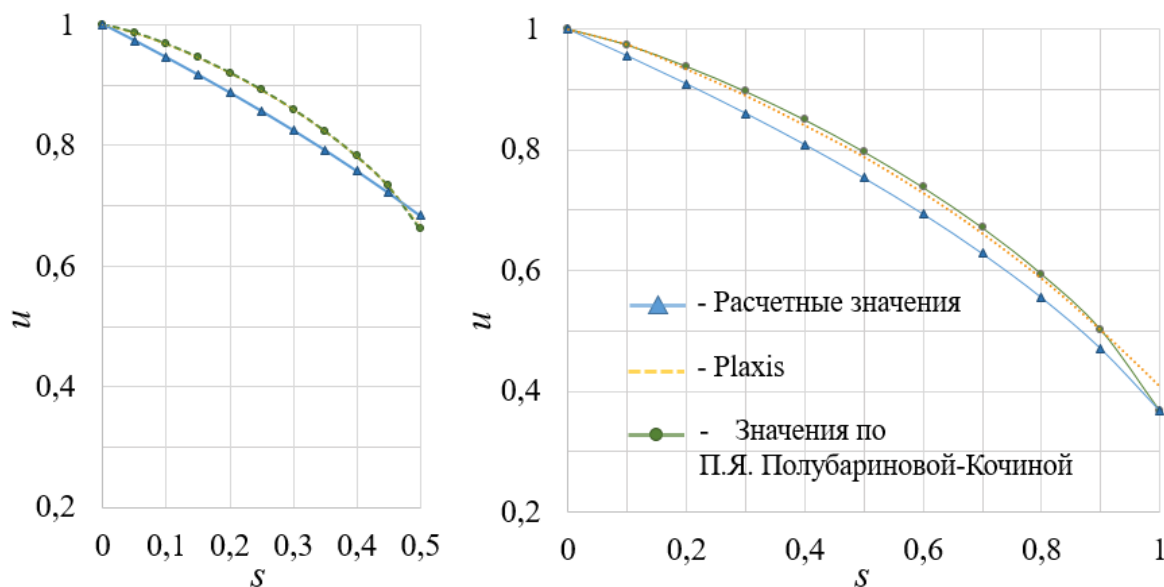


Рисунок 11 – Депрессионные кривые для перемычек $\Lambda (L/H)=0,5; 1$

Разработанная математическая модель была применена для экспресс-оценки фильтрационных характеристик временной перемычки, возводимой при строительстве причала по адресу Береговая ул., 19, г. Санкт-Петербург (рисунок 12). Используя формулы (5), (6), (7), были посчитаны координаты

мгновенных депрессионных кривых, промежутки высачивания, а также фильтрационный расход. Так как перемычка длинная ($L/H=7,22$) то установившийся промежуток высачивания практически равнялся нулю.

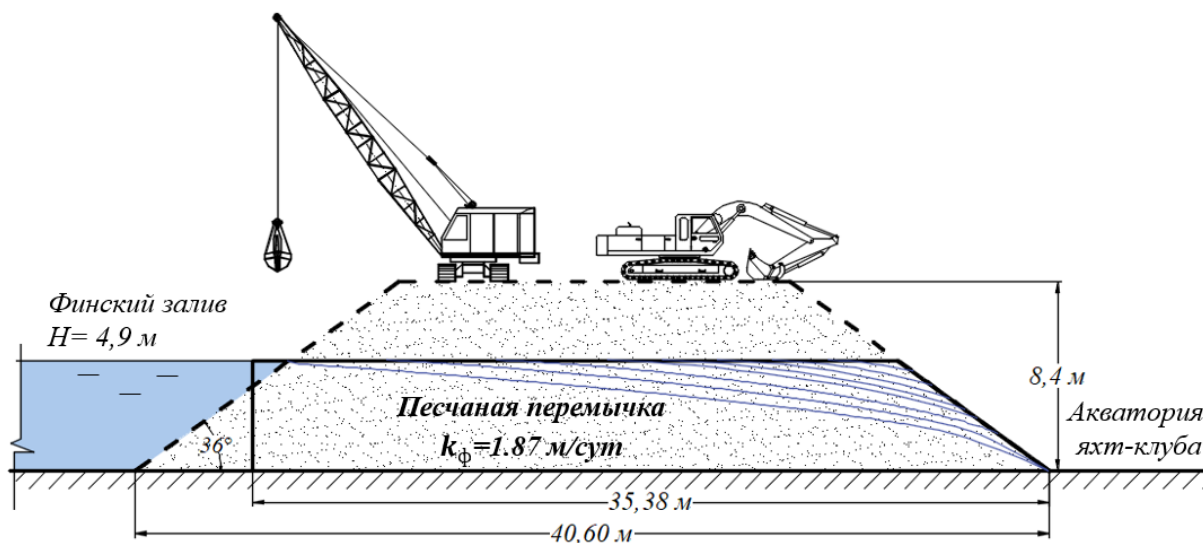


Рисунок 12 – Расчетная схема временной перемычки (продольный разрез)

Полное время стабилизации депрессионной кривой составило 18 суток. Для мониторинга временной перемычки на строительном объекте важно знать положение мгновенных депрессионных кривых (таблица 5).

Таблица 5 – Мгновенные длины депрессионных кривых (l) и координаты точек выклинивания (h_0)

l , м	3,77	7,06	10,29	13,42	16,42	22,23	29,33	33,73
t , сут	2,01	3,78	5,50	7,18	8,78	11,89	15,68	18,04
h_0 , м	4,42	3,79	3,22	2,73	2,34	1,65	0,0527	0,009

В течение всего времени стабилизации фильтрационного потока строительные работы на дамбе не проводятся, так как величины объемов насыщенного грунта и положение депрессионной кривой непрерывно изменяются. Перемычка неустойчива, поэтому не рекомендуется использовать ее гребень в качестве временной проезжей части и площадки для установки техники (строительные краны, грузовые машины).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решены задачи нестационарной фильтрации для перемычек различной конфигурации, при наличии и отсутствии дренажа. Результаты работы представлены в виде следующих положений:

1 Выполнено комплексное исследование современного состояния изученности нестационарного фильтрационного потока. Установлено, что большинство методов фильтрационных расчетов применимы для стационарной фильтрации.

2 Выявлено, что в случае безнапорной фильтрации строгие гидромеханические решения являются достаточно сложными для вычислений и получены для ограниченных размеров прямоугольной перемычки.

3 Разработана упрощенная математическая модель нестационарной фильтрации, заменяющая нелинейное уравнение Буссинеска интегральными соотношениями. Модель позволяет определить мгновенные положения депрессионных кривых и промежутков высачивания для различных относительных длин перемычек $\Lambda=L/H$ и уровней верхнего и нижнего бьефов.

4 Составлены инженерные номограммы для оперативного определения фильтрационного расхода и промежутка высачивания в прямоугольных однородных перемычках.

5 Разработан алгоритм упрощенного расчета параметров нестационарных фильтрационных потоков, рекомендуемый для стадии проектирования перемычек.

6 Проведены экспериментальные и численные исследования безнапорной фильтрации в перемычках различной длины. Данные исследования показали, что:

- чем больше относительная длина перемычки, тем значительно расход в начальный момент времени отличается от стационарного;

- время установления стационарного расхода растет с увеличением относительной длины перемычки, а скорость падения депрессионной кривой уменьшается;

- мгновенная высота промежутка высачивания определяется длиной перемычки и перепадами уровней воды между верхним и нижним бьефом. С увеличением относительной длины перемычки $\Lambda=L/H$ ее значение уменьшается.

7 Проведено сопоставление основных фильтрационных характеристик потока, посчитанных предложенным математическим методом для конкретных расчетных перемычек с лабораторными экспериментальными результатами, результатами численного моделирования, а также литературными значениями. Погрешность математической модели с точными гидромеханическими решениями находится в пределах 20% - 30% для фильтрационных расходов и промежутков высачивания. Для длинных перемычек ($L/H>2,5$) при «сухом» нижнем бьефе расхождение промежутков высачивания с литературными значениями превышает эти значения.

8 Проведены исследования эффективности точечного дренажа. При изменении относительной длины перемычки $0,8 \leq \Lambda \leq 4$ расход через дренаж увеличивается от 20% до 100%.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих рецензируемых изданиях:

Публикации в изданиях, включенных в текущий перечень ВАК РФ:

1 **Заборова, Д.Д.** Моделирование границы свободной поверхности в прямоугольной однородной грунтовой перемычке / Заборова Д.Д., Локтионова

Е.А., Мусорина Т.А. // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 12. – С.49–53.

2 **Заборова, Д.Д.** Математическая модель нестационарной фильтрации в однородных изотропных перемычках / Д.Д. Заборова, Г.Л. Козинец, Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 4. – С.38–44.

3 Петриченко, М.Р. Метод Крокко в гидравлической теории фильтрации - однородная прямоугольная перемычка / М.Р. Петриченко, **Д.Д. Заборова**, Е.В. Котов // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 6. – С.41–44.

4 Петриченко, М.Р. Образование промежутка высачивания в прямоугольной перемычке / М.Р. Петриченко, **Д.Д. Заборова**, Е.В. Котов, Т.А. Мусорина // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 10. – С.49–52.

5 **Заборова, Д.Д.** Парадокс Дюпюи и математическое моделирование нестационарной фильтрации в однородной перемычке / Д.Д. Заборова, М.Р. Петриченко, Т.А. Мусорина // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2018. – Т. 11(2). – С.49–60.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных SCOPUS, WoS:

6 **Zaborova, D. D.** Mathematical Model for Unsteady Flow Filtration in Homogeneous Closing Dikes / D.D. Zaborova, G.L. Kozinec, T.A. Musorina, M.R. Petrichenko // Power Technology and Engineering. – 2020. – Т.54(3). – С.358–364.

7 **Zaborova, D.** Non-stationary filtration through a homogeneous rectangular closing dike / D. Zaborova, T. Musorina and M. Petrichenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №883(1). – 012043.

8 Petrichenko, M.R. The Crocco Method in Hydraulic Filtration Theory — A Homogeneous Rectangular Dam / M.R. Petrichenko, **D.D. Zaborova**, E.V. Kotov // Power Technology and Engineering. – 2019. – №53(4). – С.445–448.

9 **Zaborova, D.D.** Technology of rapid dewatering for excavations. D.D. Zaborova, M.R. Petrichenko // Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III- Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT. – 2018. – С.663–668.

10 Gabitova, G. Experimental determination of permeability coefficient / G. Gabitova, **D. Zaborova**, S. Barinov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Т. 692. – С.830-836.

Публикации в других печатных изданиях:

11 **Заборова, Д.Д.** Моделирование границы свободной поверхности в прямоугольной однородной грунтовой перемычке / Заборова Д.Д., Локтионова Е.А., Мусорина Т.А. // Сборник тезисов докладов V Всероссийского научно-практического семинара «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». – 2022. – С.114.