

На правах рукописи



АБДУЛАМИР ЛЕЙС САИД АБДУЛАМИР

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РЕЖИМ В ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ
ПОДАЧИ ВОДЫ НА МЕЛИОРИРОВАННЫЕ ЗЕМЛИ**

Специальность: 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и
инженерная гидрология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Джумагулова Назира Тентимишовна

Официальные оппоненты: **Ольгаренко Игорь Владимирович**
Доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научно-инновационной работе, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова, филиал ФГБОУ ВО Донской ГАУ;

Щербаков Алексей Олегович
кандидат технических наук,
заведующий отделом гидротехники и гидравлики,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Защита состоится «12» сентября 2023 г. в 14:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. № 9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бестужева Александра
Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гидравлические потери должны учитываться при проектировании систем подачи и отвода в напорных трубопроводах. Исходя из этого, выбираются размеры труб и необходимые гидромеханические оборудования для обеспечения работоспособности трубопроводной системы.

Несмотря на то, что турбулентное движение жидкости часто наблюдается на практике, теория турбулентности до сих пор не считается полностью разработанной.

В настоящее время возможно дальнейшее развитие гидравлических методов расчета турбулентных течений в напорных и безнапорных трубопроводах благодаря новым методам измерения и эффективным компьютерным методам обработки экспериментальных данных, что повышает надежность работы трубопроводной системы и точность расчетов.

В связи с этим проблема заключается в расчете потерь напора в напорных трубопроводах, средней скорости и степени заполнения трубопроводов в безнапорных трубопроводах, определение гидравлического режима потока остается актуальной для дальнейших исследований в соответствии с новыми задачами. Для решения проблемы дефицита воды на орошение в г. Кербель (Ирак) впервые было принято использовать очищенные сточные воды с городских очистных сооружений. Подача воды от очистных сооружений до орошаемых земель осуществляется по трубопроводу в напорном и безнапорном режиме. До сих пор подача воды осуществлялось по открытым лоткам и каналам.

Степень разработанности темы исследования. Турбулентному режиму движения жидкости в напорной и безнапорной системе трубопроводов посвящены исследования ученых, как в Российской Федерации, так и за рубежом, наиболее известными из которых являются Гиргидов А.Д., Идельчик И.Е., Киселев П.Г., Тарасов В.К., Штеренлихт Д.В., Риффель Е. В., Егорова Ю.А., Зуйков А.Л., Новицкий Н.Н., Орлов В. А., Михайловский Е.А., С. М. Щербаков, Нгуен Х.К., Чан В.З., Elhay S., Simpson A. R., Valiantzas J. D., Achour, B., Amara, L. и других, было посвящено много исследований.

Цель работы - исследование гидравлических характеристик потока при подаче очищенных сточных вод по напорной и безнапорной системе трубопроводов.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих математических моделей для определения гидравлических характеристик потока в трубопроводах;
2. Определение гидравлических характеристик потока при движении воды по напорным трубопроводам, сравнение потери напора, определенной с помощью формул Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса;
3. Определение оптимального диаметра и материала труб с учетом снижения затрат на подачу потока воды на большие расстояния и больших диаметров с использованием программного обеспечения WaterCAD V8i;
4. Проведение экспериментальных исследований по определению потерь напора и коэффициента гидравлического сопротивления для напорных труб из различных материалов, сравнение этих результатов с результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i;
5. Проведение экспериментальных исследований по определению средней скорости при различной степени наполнения и уклона для безнапорной трубы, сравнение этих результатов с результатами, полученными традиционными методами и программного обеспечения SewerCAD;

6. Определение гидравлических характеристик потока в безнапорной и комбинированной системе транспортирования жидкости с помощью программного обеспечения SewerCAD.

Научная новизна работы

1. Проведена перспективная оценка водных ресурсов на территории административного округа Кербела для целей развития мелиорации сельхозугодий и предложено использовать для их орошения очищенные сточные воды, подаваемые на мелиорированные земли по трубопроводам;
2. Получены расчетные зависимости потерь напора в трубах из различных материалов при параллельном сопоставлении формул Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса;
3. Разработана методика выбора оптимального диаметра трубопроводов и материала как для напорной, так и безнапорной систем мелиорации;
4. Методика оптимизационного выбора диаметров трубопроводов и материалов апробирована применительно к напорной, безнапорной и комбинированной (напорно-безнапорной) системам подачи воды для орошения мелиорируемых земель административного округа Кербела;
5. На основе экспериментальных исследований напорного и безнапорного движения воды в трубопроводах проведена верификация результатов гидравлических расчетов, выполненных традиционным методом и с применением ПО WaterCAD V8i и SewerCAD.

Теоретическая значимость работы. Применение современных методов расчета гидравлических параметров в напорных и безнапорных трубопроводах с турбулентным течением.

Практическая значимость результатов. В диссертации определены гидравлические характеристики потока на магистральном трубопроводе получены с использованием программного обеспечения WaterCAD V8i, традиционными методами расчета и верификация полученных результатов расчета проведением эксперимента, что дает возможность более точных данных гидравлических характеристик потока и уровень надежности и безопасности эксплуатации трубопроводной системы. Отсюда следует вывод о возможности широкого применения методики и результатов расчета на практике.

Методология и методы исследований. Использование результатов экспериментальных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i позволяет повысить точность и достоверность гидравлических расчетов, используемых при проектировании водопроводных труб.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов доказывается согласием результатов экспериментальных с результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i и SewerCAD.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты аналитических исследований по снижению дефицита воды за счет использования очищенных сточных вод в административном округе Кербела;
2. Сравнение формул Дарси - Вейсбаха и Хазена - Вильямса для определения потери напора, по результатам которых были получены зависимости для четырех типов материалов труб;
3. Расчет экономически выгодного диаметра трубы с использованием программного обеспечения WaterCAD V8i;
4. Результаты экспериментальных исследований потерь напора и коэффициента гидравлического сопротивления при различных расходах потока и числах Рейнольдса в турбулентном режиме движения воды для различных материалов труб;
5. Результаты экспериментальных исследований скоростей потока при различных уклонах, расходах и наполнении в трубе для безнапорного режима движения воды;

6. Расчет гидравлических характеристик потока в комбинированной системе транспортирования жидкости с помощью программы SewerCAD.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации опубликованы на 3-х научных конференциях: III Всероссийском научно-практическом семинаре «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, 17 июня 2020 г.). Четвертой Международной конференции по инженерным наукам между Университетом Кербела (Ирак) и Технологическим университетом Суинберна в Австралии, 5 декабря 2020 г. Всероссийском научно-практическом семинаре «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. К 90-летию гидротехнического образования в НИУ МГСУ» (г. Москва 25 мая 2022 г.).

Личный вклад автора в получение результатов. Самостоятельность исследования и личный вклад автора работы заключаются в проведении экспериментальных исследований и численных расчетов по определению гидравлических характеристик турбулентного потока в напорных и безнапорных трубах из различных материалов, а также в разработке методов оптимизационных расчетов и их апробации на исследуемом объекте.

Публикации. Материалы диссертации в достаточно полной степени изложены в 10-и научных публикациях, из которых 6 работ опубликованы в научном журнале, включённом в перечень ВАК РФ, 1 работа в научном журнале, индексируемом в базе Scopus, 3 работы в других научных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения. Объём работы составляет 176 страниц. Текст диссертационного исследования иллюстрирован 52 рисунками и содержит 34 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность научной работы, сформулированы цели и задачи исследований.

В **первой главе** выполнен анализ водопотребления населением из реки Аль-Хуссайния, анализ существующих математических моделей для определения гидравлических характеристик потока в трубопроводе, методика гидравлического расчета движения жидкости в напорных трубопроводах и сравнение формул Хазена-Вильямса и Дарси-Вейсбаха для определения потерь напора с использованием программы WaterCAD V8i.

Основным источником водоснабжения для хозяйственно-питьевых, промышленных и сельскохозяйственных нужд является река Аль-Хуссайния. Его протяженность составляет 30.6 км. Средний расход воды в реке (20 - 25) м³/с летом и (5-10) м³/с зимой (рис. 1.).

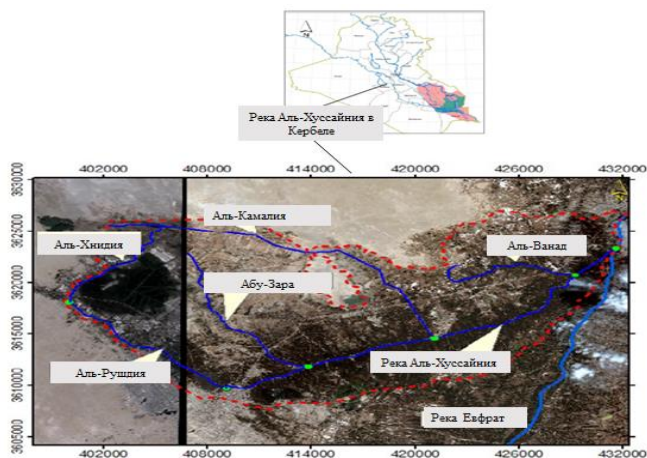


Рис. 1 Река Аль-Хусейния и ее пять рукавов.

Сравнение потребления воды населением на хозяйственно-бытовые нужды, промышленность и сельское хозяйство с фактическим расходом реки представлено на рис. 2.

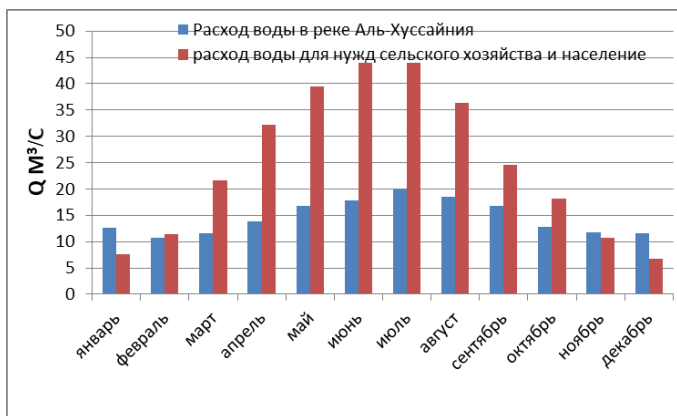


Рис. 2 Сравнение потребления воды населением и среднего расхода реки Аль-Хусейния за период (2014-2019)

Из рис. 2 видно, что водообеспечения для нужд населения хватает только на три месяца в году; начиная с февраля по октябрь наблюдается перебои с водоснабжением. Для устранения дефицита воды принято использовать очищенные сточные воды для ирригационных нужд.

В рамках диссертационной работы проведен анализ в сфере систем подачи воды. Представленный ниже анализ проведен на основе следующих программных продуктов, использующихся при проведении гидравлических расчетов: ZuluHydro, ИСИГР, ИГС «CityCom-ГидроГраф», Bentley WaterCAD, Mike Urban, Autocad Civil 3D.

Российские программные продукты Zuluhydro (Российская компания Политерм), ИСИГР (Институт систем энергетики Л.А. Мелентьев, Сибирский), ИГС «CityCom-ГидроГраф») (Информационно-вычислительный центр «Поток»), позволяют решать следующие задачи: ситуационное моделирование и анализ режимов движение потока воды, а также гидравлические расчеты сетей движения потока воды. В данных моделях отсутствует возможность автоматической калибровки моделей.

Одной из задач исследования является проверка результатов гидравлических расчетов зарубежных программ путем проведения лабораторных экспериментов, а также их сравнение с

традиционными российскими методиками, поэтому были выбраны программы WaterCAD CAD V8i и SewerCAD (Bentley Systems).

В зарубежной практике широко применяется программное обеспечение WaterCAD V8i и SewerCAD. Программа Bentley WaterCAD записывает результаты гидравлических расчетов систем подачи и распределения воды в базу данных и формирует множество выходных данных. Было принято решение, проверить с помощью эксперимента и традиционных методов, результаты расчетов, выполненные с помощью этих ПО.

Наиболее распространенными для определения потерь напора потока под давлением являются Формулы Хазена-Вильямса (Х-В) и Дарси-Вейсбаха (Д-В).

Формула Дарси-Вейсбаха используется для расчета гидравлических потерь по длине прямолинейных участков напорных трубопроводов:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Где: $h_{\text{тр}}$ – гидравлические потери по длине (м), λ – коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициенты трения Дарси- Вейсбаха), D – диаметр трубы (м), L – длина трубы (м), V – скорость потока (м/с), g – ускорение свободного падения (м/с²).

Обобщенная же формула Альтшуля, пригодная для определения коэффициента сопротивления при течении в зоне гладкого, шероховатого, а также смешанного трения (практически пригодная для всех зон турбулентного режима), имеет вид:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (2)$$

Где: Δ – абсолютной шероховатости стенок (м).

Формула Хазена-Вильямса - эмпирическая формула, широко используемая в технике водоснабжения для течения воды по трубам, принадлежит Г. С. Уильямсу и А. Хазену. Это соотношение, известное как формула Хазена-Уильямса,

$$h_f = \frac{7.8828 L}{k^{1.852} D^{4.8704}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.85} \quad (3)$$

Где: h_f - потери напора (м), Q - расход в секции (м³/сек), C - Хазен- Вильямс коэффициент трения. Значение C колеблется в пределах от 80 для шероховатых труб и примерно до 150 для гладких труб, k - Константа (0.849 для единиц СИ).

Программа WaterCAD использует уравнение Свами-Джайна для определения коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\lambda = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

Где ε – величина абсолютной шероховатости, м.

В работе проведено сравнение двух методик расчетов потерь напора, вычисленными с помощью формул Хазена-Вильямса и Дарси-Вейсбаха для различных типов труб при подаче воды на мелиорированные земли в городе Кербела (Ирак) с использованием программы WaterCAD V8i. Были произведены следующие вычисления:

- определение потерь напора по формулам Хазена-Вильямса и Дарси-Вейсбаха для четырех типов труб при двух расходах;
- нахождение коэффициента корреляции потерь напора между двумя упомянутыми формулами.

Собрана информация по очистным сооружениям очистки сточных вод в Кербеле (Ирак), на данный момент с новой станции очистки сточных вод расход составляет 1.16 м³/с., после подключения дополнительных районов расход составит 4.63 м³/с.

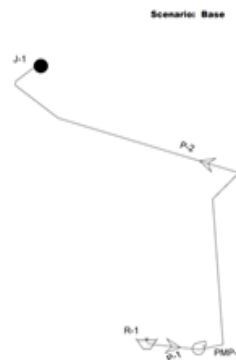
С использованием программного обеспечения WaterCAD V8i произведены расчеты по определению оптимального диаметра труб для двух вариантов расходов:

- 1) Для расхода $1.16 \text{ м}^3/\text{с}$ диапазон диаметров труб от 800 мм до 1200 мм;
- 2) Для расхода $4.63 \text{ м}^3/\text{с}$ диапазон диаметров труб от 1600 мм до 2000 мм.

Расчеты выполнены в программе WaterCAD V8i со всеми необходимыми исходными данными. На рис. 3 представлена разработка схемы транспортировки очищенных сточных вод на мелиорированные земли в городе Кербела.



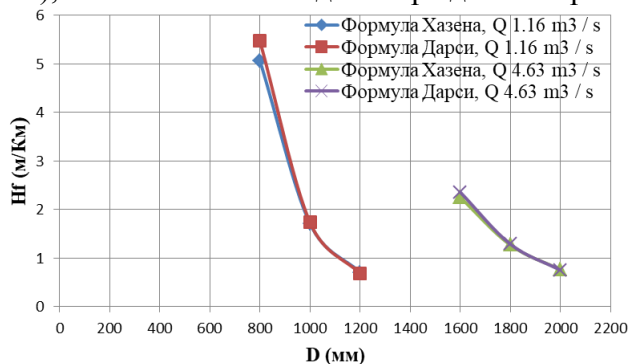
а. Расположение новой станции и мелиорированных земель



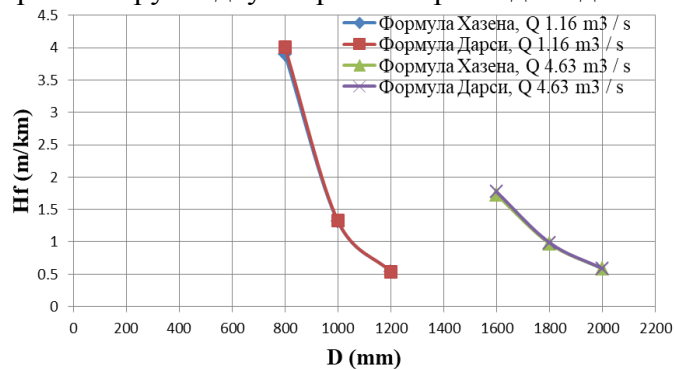
б. Расчётная схема

Рис. 3 Схема подачи воды на мелиорированные земли в городе Кербела. R-1 – источник воды, представляющий новые очистные сооружения; P-1 – участок от новой станции до насоса; PMP-1 насос; P-2 – от насоса до мелиорированных земель; J – подача воды на мелиорированные земли.

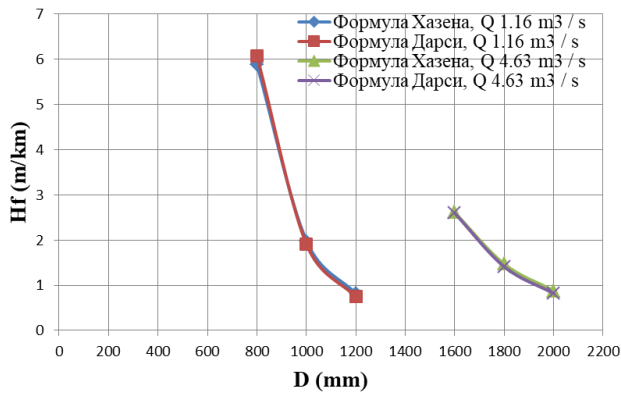
На Рис. 4 показана разница потерь напора, полученная с использованием формул (Д-В) и (Х-В), в зависимости от диаметра для четырех материалов труб и двух вариантов расхода воды.



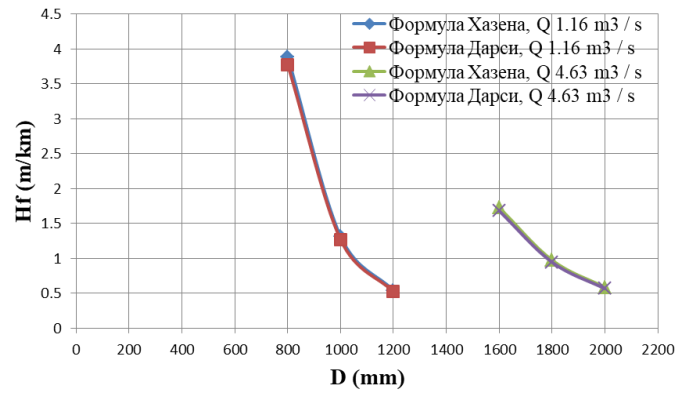
а. Ковкий чугун



б. стеклопластик GRP



с.Бетон



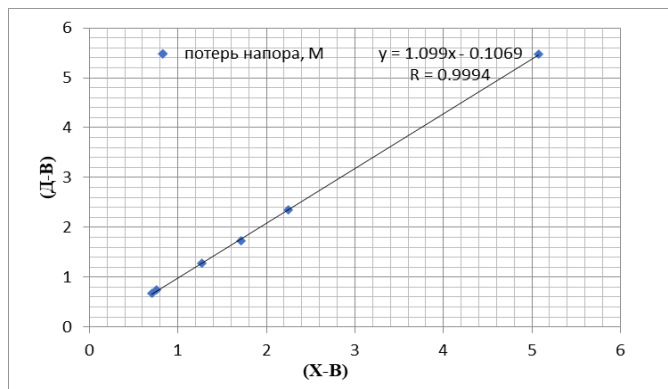
d.Пластик

Рис. 4 Зависимость потери напора от диаметра для различных материалов труб: а. ковкий чугун, б. стеклопластик GRP, с. бетон, d. пластик

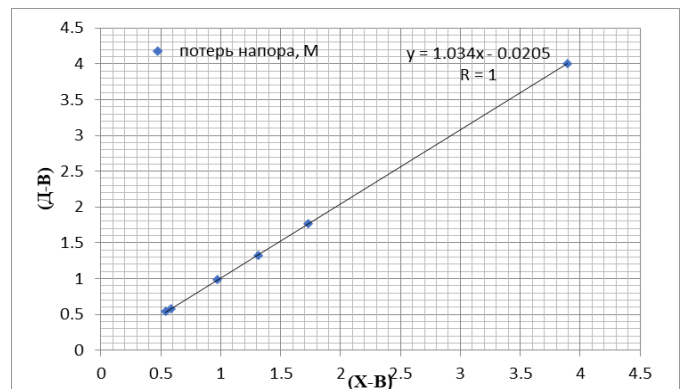
Как видно из рис.4, увеличение потерь напора может наблюдаться при уменьшении диаметра трубы как для формулы Дарси – Вейсбаха также и для Хазена – Вильямса. Результаты также показали, что значения потерь напора в двух формулах были близки для всех материалов труб и для двух расходов воды.

Для первого варианта, самые высокие значения потерь напора были при диаметре **800 мм**, они составили 6 м/км для бетона, в формуле Дарси, в то время как самое низкое значение для того же диаметра было 3.7 м/км для пластика в той же формуле, из-за разной шероховатости и материала труб.

После сравнения значения потерь напора, полученные по двум формулам, определены коэффициенты корреляции. На рис. 5 представлены зависимости потерь напора между формулами Дарси-Вейсбаха и Хазена-Вильямса.



а



b

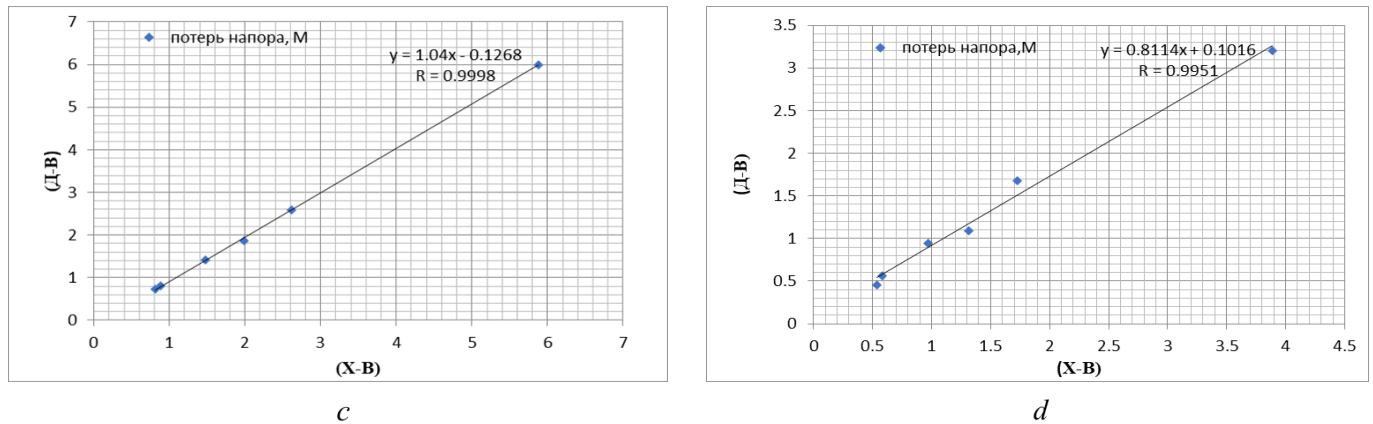


Рис. 5 Зависимости потерь напора между формулами Дарси-Вейсбаха и Хазена-Вильямса: а.ковкий чугун, б.стеклопластик GRP, с.бетон, d.пластик.

Из рис. 5, зависимости между значениями потерь напора являются линейными, для ковкого чугуна:

$$y = 1.099 * x - 0.1069 \quad (5)$$

(5) можно переписать в терминах изучаемых переменных как (Д_В) и (Х_В):

$$(Д_В) = 1.099 \times (Х_В) - 0.1069$$

То же самое и с остальными материалами труб:

$$\text{Для GRP } (Д_В) = 1.034 \times (Х_В) - 0.0205 \quad (6)$$

$$\text{Для бетона } (Д_В) = 1.04 \times (Х_В) - 0.1268 \quad (7)$$

$$\text{Для пластика } (Д_В) = 0.8114 \times (Х_В) + 0.1016 \quad (8)$$

Где (Д_В) и (Х_В) - потери напора в метрах на километр (м/км) трубы, полученной с помощью формулы Дарси-Вейсбаха и формулы Хазена-Вильямса соответственно. Линия тренда R оказалась равной 0.9994, 1, 0.9998 и 0.9951 для труб из ковкого чугуна, стеклопластика GRP, бетона и пластика.

Во второй главе описываются выбор экономически наиболее выгодного диаметра трубы с использованием программного обеспечения WaterCAD V8i.

В нашем случае рассматривается магистральная сеть, которая решается также с помощью программного обеспечения WaterCAD. Кроме того, в расчетах использован Darwin Designer, более усовершенствованный инструмент в WaterCAD, позволяющий найти решения с минимальными эксплуатационными затратами. Фиксированная стоимость учитывает затраты на материалы труб.

В работе приняты стоимость материала труб без учёта строительных работ и эксплуатация трубы в течение одного года без учёта амортизационных затрат.

В работе приняты 4 вида материала труб (ковкий чугун, стеклопластик GRP, бетон и пластик).

Итак, необходимо определить оптимальный диаметр труб, с учетом минимальных энергозатрат на транспортирование воды.

$$C_t = C_f + C_o \quad (9)$$

$$C_t = \sum_{f=1}^{N_{PP}} C_f L_f + \sum_{t=1}^{N_{Pm}} C_o L_t, \quad (10)$$

где C_t – общая стоимость, \$/год; C_f – фиксированная стоимость в год, \$/м, при диаметре D, мм; L_f – длина i-й трубы, м; N_{PP} – количество труб; C_o – эксплуатационные расходы, \$/год; L_t – длина t-й трубы, м, и N_{Pm} – тип материала трубы.

Постоянные и эксплуатационные расходы

Фиксированная стоимость (C_f) трубопровода, L выражается как:

$$C_f = P \times L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (11)$$

Стоимость эксплуатации (C_o) также зависит от следующих факторов:

$$C_o = f(d, Q, hf, t, C_e, \eta) \tag{12}$$

Годовые эксплуатационные расходы на преодоление трения составляют:

$$C_o = \frac{0.746\rho g Q h_f \times C_e \times t}{75\eta} \tag{13}$$

При подстановке значения $h_f = \frac{8\lambda l Q^2}{\pi^2 g d^5}$ в уравнении (13)

$$C_o = \frac{8.103 \times 10^{-4} \times \rho \times Q^3 \times l \times \lambda \times C_e \times t}{\eta \times d^5} \tag{14}$$

Годовые потери энергии из-за трения (PS) рассчитываются в киловатт-часах в виде:

$$PS = \frac{0.746 \times \rho g \times Q \times h_f \times t}{75\eta} \tag{15}$$

Таким образом, $C_t = C_f + C_o$

$$C_t = P \times L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{8.103 \times 10^{-4} \times \rho Q^3 l \lambda \times C_e \times t}{\eta d^5} \tag{16}$$

Где d – диаметр трубы (м), Q – расход ($\text{м}^3/\text{сек}$), hf – потери напора из-за трения (м), t – часы работы насоса, час / год, C_e – стоимость электроэнергии (\$ / кВтч), η – КПД безразмерной величиной (в процентах), P – цена за единицу длины трубы (\$ / м), i – процентная ставка, учитывающая срок окупаемости (в нашей работе затраты рассчитывались на один год, поэтому этот параметр не учитывался), n – срок службы трубы (лет) и L – длина трубы (м).

Результаты вычисления модели свидетельствуют, что оптимальный диаметр для первого варианта составлял 800 мм из пластика при стоимости 2173770 долларов (163032750руб)(цена трубы на весь участок 8200 км) и стоимости подачи воды в течение одного года. Результаты второго варианта составили 1600 мм для стеклопластика GRP стоимостью 4 415 600 долларов (331170000 руб.). На Рис. 6 показаны результаты расчетов обоих вариантов.

Darwin Designer (Optim. Main Pipe line +cost transporting.wtg): Cost 4 material +cost transporting 1 model Design Group Results				
Design Group	Pipe	Material	Darcy-Weisbach e (m)	
Design Group - P-1	P-1	PVC	0.000010	
Design Group - P-2	P-2	PVC	0.000010	
Diameter (mm)		Cost (\$)		
800.0		26,190.00		
800.0		2,147,580.00		
Rehabilitation Group Results				
Rehabilitation Group	Pipe	Design Rehabilitation Action	Cost (\$)	
Pressure Results				
Design Event	Element	Required Minimum Pressure (m H2O)	Required Maximum Pressure (m H2O)	Simulated Pressure (m H2O)
GRP, Duct.D800-1200 mm	J-1	6	40	7
Violation (m H2O)		0		
Velocity Results				
Design Event	Element	Minimum Velocity (m/s)	Maximum Velocity (m/s)	Simulated Velocity (m/s)
Violation (m/s)				

а. Первый вариант

Darwin Designer (Optim. Main Pipe line +cost transporting 2 model.wtg): New Optimized Design Run - 1 Design Group Results				
Design Group	Pipe	Material	Darcy-Weisbach e (m)	
Design Group - P-1	P-1	GRP	0.00003	
Design Group - P-2	P-2	GRP	0.00003	
Diameter (mm)		Cost (\$)		
1,600.0		53,200.00		
1,600.0		4,362,400.00		
Rehabilitation Group Results				
Rehabilitation Group	Pipe	Design Rehabilitation Action	Cost (\$)	
Pressure Results				
Design Event	Element	Required Minimum Pressure (m H2O)	Required Maximum Pressure (m H2O)	Simulated Pressure (m H2O)
GRP, Duct.D800-1200 mm	J-1	6	40	18
Violation (m H2O)		0		
Velocity Results				
Design Event	Element	Minimum Velocity (m/s)	Maximum Velocity (m/s)	Simulated Velocity (m/s)
Violation (m/s)				

б. Второй вариант

Рис. 6 Оптимальный диаметр трубы с использованием WaterCAD V8i.

Программное обеспечение дало возможность произвести оптимальный выбор по диаметру и материалам труб с учетом проектных ограничений, т.е. давления, скорости. Кроме того, с

помощью программы удалось произвести расчет затрат на подачу воды по трубопроводу и подобрать наиболее оптимальный вариант.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению потерь напора и коэффициента гидравлического сопротивления для напорных труб из различных материалов, сравнение этих результатов с результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i.

Подача воды от очистных сооружений до орошаемых земель осуществляется по трубопроводу в напорном режиме. В работе сравниваются результаты имитационного моделирования с использованием программы WaterCAD V8i при различных расходах в напорной системе подачи воды с результатами лабораторных исследований для трех типов материалов труб (1. стальная труба диаметром 100 мм с полимерным покрытием, 2. полиэтиленовая труба диаметром 100 мм и 3. стальная труба диаметром 100 мм с цементно-песчаным покрытием (диаметр 90 мм)). В работе проводится верификация результатов, полученных в программе WaterCAD V8i, с результатами экспериментов на различных типах труб.

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Московского государственного строительного университета, схема установки представлена на рис. 7.



Рис. 7 Общий вид гидравлического стенда

Для расчета гидравлических параметров в трубопроводах использовались следующие формулы:

$$\text{средняя скорость } V_{\text{cp}} \text{ (м/с)} \quad V_{\text{cp}} = Q_{\text{cp}} / \omega \quad (17)$$

где Q_{cp} - расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$), ω - живое сечение (м^2)

$$\text{-потери напора } \Delta h \text{ (м)} = H_{1п} - H_{2п} \quad (18)$$

$$\text{-коэффициент Дарси } \lambda = 2g\Delta h d / L V_{\text{cp}}^2 \quad (19)$$

где $H_{1п}$ – показания на пьезометре (м), L – длина экспериментального участка(м).

По данной методике были рассчитаны значения соответствующих гидравлических параметров потока, для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием, которые представлены в таблице (1).

Как видно из табл. (1), с увеличением расхода воды в трубе увеличиваются значения всех гидравлических параметров, кроме коэффициента гидравлического сопротивления. Это связано с тем, что существует обратная зависимость между коэффициентом гидравлического сопротивления и числом Рейнольдса, которое зависит от скорости потока. Зависимость между потерей напора и расходом в трубах из различных материалов изображена на рис. 8.

Необходимо отметить, что наименьшие потери напора наблюдались в стальной трубе диаметром 100 мм с полимерным покрытием по сравнению с полиэтиленовой трубой. Кроме того,

стальная труба диаметром 100 мм с цементно-песчаным покрытием (диаметр 90 мм) имела самые большие потери по сравнению с другими типами, так как чем меньше диаметр трубы, тем больше потери напора.

Таблица 1 Результаты экспериментов для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием

Номер п.п.	Расходы воды Q , м ³ /с	Средняя скорость V_{cp} , м/с $V_{cp} = Q_{cp} / \omega$	Потери напора Δh , м $\Delta h = H_{1п} - H_{2п}$	Коэффициент Дарси λ $\lambda = 2g\Delta h d / LV_{cp}^2$
	Среднее значение Q_{cp}			
1	2	3	4	5
1	0.00644	0.82089	0.05	0.01455
2	0.00644	0.82038	0.05	0.01457
3	0.0073	0.92993	0.075	0.01701
4	0.00823	1.04879	0.093	0.01658
5	0.00830	1.05783	0.1024	0.01795
6	0.00868	1.10573	0.118	0.01893
7	0.00862	1.09808	0.116	0.01887
8	0.00669	0.85324	0.0560	0.01509
9	0.00671	0.85477	0.0565	0.01517
10	0.00679	0.86573	0.068	0.01780
11	0.00680	0.86636	0.059	0.01542
12	0.006873	0.87554	0.064	0.0163804
13	0.006929	0.88267	0.06	0.0125912
14	0.008707	1.10917	0.1175	0.0187387
15	0.0087391	1.11326	0.115	0.0182055
16	0.008733	1.11248	0.120	0.0190236

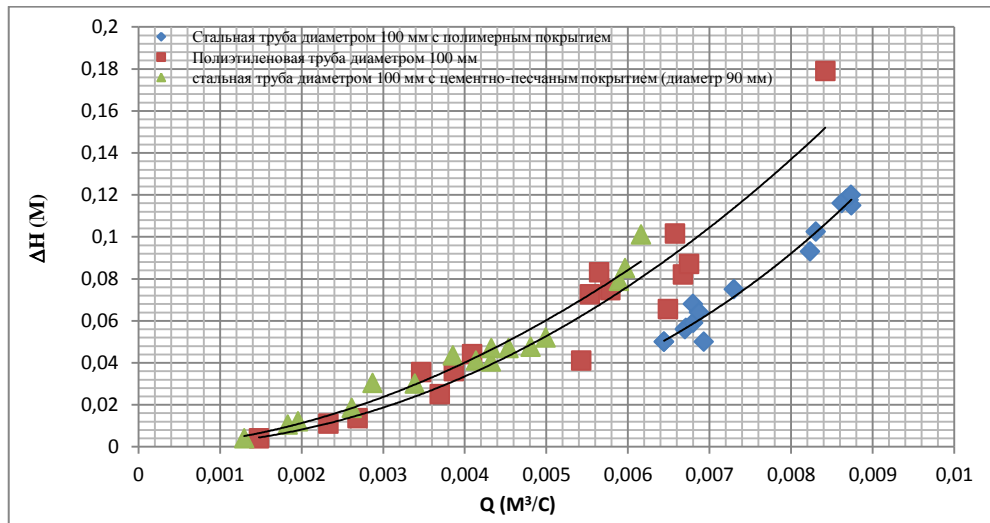


Рис. 8 Зависимость между потерями напора и расходом для труб из различных материалов

Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i.

Для моделирования гидравлического режима воды в трубе использовалась программа WaterCAD V8i. Выполнены традиционным методом гидравлические расчеты для труб разного диаметра и из различных материалов, потери напора в системе рассчитывались с использованием формулы Дарси–Вейсбаха. Результаты эксперимента, программы и традиционных методов для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием при различных расходах представлены в таблице 2. В программе используется формула Свами-Джайна для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, в то время как формула Дарси–Вейсбаха использовалось в экспериментальных исследованиях для получения коэффициента гидравлического сопротивления.

Таблица 2 Сравнение результатов стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием

Номер п.п.	Расходы воды Q, м ³ /с	λ (Свами-Джайн)	λ (Альтшуль)	Δh (эксперимент), м	Δh (Свами-Джайн), м	Δh (Альтшуль), м	Δh (Хазена-Вильямса), м	Re
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.00644	0.01918	0.01924	0.05922	0.06574	0.06596	0.06475	81185
2	0.00669	0.01904	0.01908	0.06748	0.07058	0.07073	0.06964	84437
3	0.00671	0.01903	0.01907	0.06369	0.07081	0.07095	0.06987	84588
4	0.00692	0.01891	0.01893	0.06525	0.07505	0.07512	0.07415	87349
5	0.0073	0.01873	0.01872	0.07413	0.08248	0.08243	0.08167	92026
6	0.00823	0.01831	0.01823	0.09205	0.10260	0.10212	0.10205	103788
7	0.00862	0.01816	0.01805	0.1	0.11153	0.11084	0.11111	108667
8	0.00870	0.01813	0.01801	0.1175	0.11359	0.11285	0.11320	109763
9	0.00873	0.01812	0.01800	0.11	0.11421	0.11345	0.11382	110091
10	0.00873	0.01812	0.01800	0.12	0.11435	0.11359	0.11397	110168

Как видно из таблицы 2, экспериментальные, рассчитанные программой и традиционными методами потери напора близки по значению. Далее сравнение результатов эксперимента с

результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i для потери напора представлены на рис. 9.

Из рисунка 9 видно, что потери напора в программе WaterCAD V8i были несколько выше, чем в экспериментальных, а при увеличении расхода было отмечено, что результаты практически идентичны. Зависимость между экспериментальной потерей напора и программного обеспечения WaterCAD V8i представлены на рис. 10. Необходимо отметить, что коэффициент корреляции составил $R=0.993$.

Измеренные и рассчитанные коэффициенты сопротивления при различных числах Рейнольдса показаны на рис. 11. Взаимосвязь между экспериментальным коэффициентом гидравлического сопротивления и программного обеспечения WaterCAD V8i на рис. 12. Необходимо отметить, что коэффициент корреляции составил $R=0.9937$.

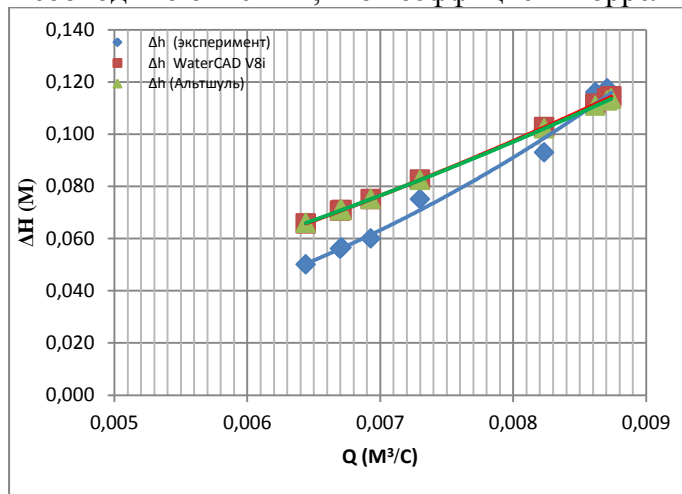


Рис. 9 Сравнение результатов потери напора

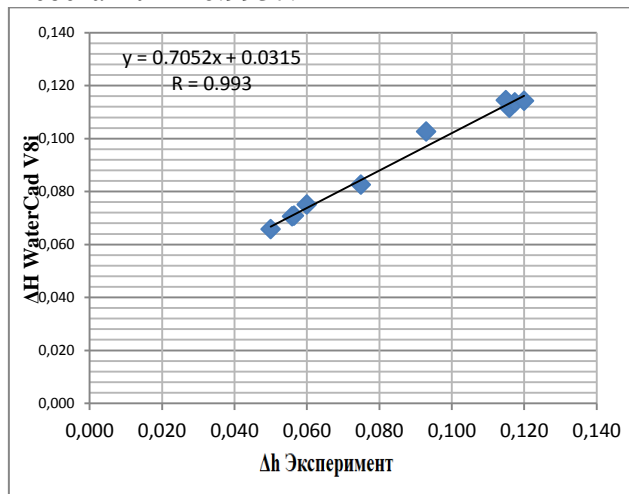


Рис. 10 Зависимость между экспериментальной потерей напора и расчётной по WaterCAD V8i

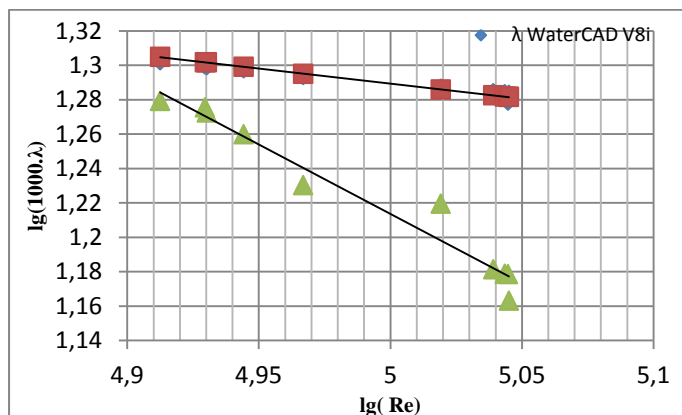


Рис. 11 Зависимость между коэффициентом гидравлического сопротивления и числом Рейнольдса

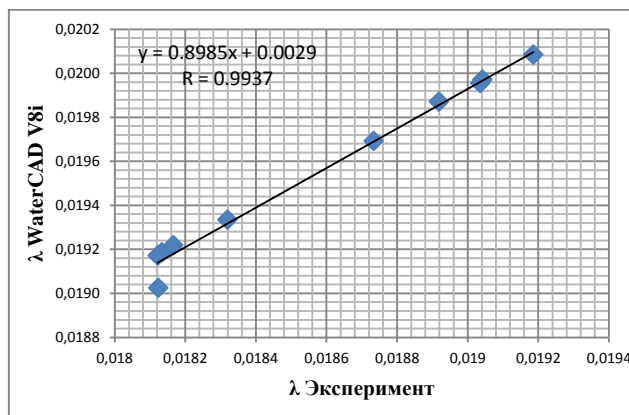


Рис. 12. Взаимосвязь между экспериментальным коэффициентом гидравлического сопротивления и программного обеспечения WaterCad V8i

Результаты проведенной работы по сопоставлению экспериментальных данных с расчетами, полученными по программе WaterCAD V8i и традиционным методом, позволяют сделать вывод о возможности широкого использования ее на практике для определения гидравлических характеристик потока в трубопроводах.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования по определению гидравлических характеристик потока в полиэтиленовом безнапорном трубопроводе диаметром 100 мм и сравнение этих результатов с результатами, полученными традиционными методами и программой SewerCAD, что позволило спроектировать комбинированную систему магистральных трубопроводов для подачи воды на мелиорированные земли.

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) где изучалось течение жидкости при безнапорном режиме и определялись его гидравлические параметры, схема установки представлена на рис. 13.



Рис. 13 Общий вид гидравлического стенда со стороны накопительной емкости

В основе гидравлических расчетов безнапорных (самотечных) трубопроводов лежит условие соблюдения установившегося равномерного движения воды в трубах по двум основным формулам: непрерывности потока (20) и Шези (21):

$$Q = \omega \cdot V \quad (20)$$

$$V = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (21)$$

где Q – измеренный расход воды ($\frac{м^3}{с}$); ω – площадь живого сечения потока ($м^2$); V – средняя скорость потока ($м/с$); C – коэффициент Шези, ($м^{0,5}/с$); R – гидравлический радиус; равный:

- при полном наполнении труб:

$$R = \frac{d}{4} \quad (22)$$

- при различной степени наполнения трубы (безнапорный режим):

$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (23)$$

где d – внутренний диаметр трубопровода; i – гидравлический уклон; ω – площадь живого сечения потока; χ – величина смоченного периметра трубы, изменяющаяся в диапазоне от $\frac{h}{d} = 0.1$ до 0.8 .

- коэффициент Шези определяется по формуле (21)

$$C = V/\sqrt{Ri}$$

- коэффициент Дарси определяется по формуле:

$$\lambda = 8g / C^2 \quad (24)$$

Для исследуемой полиэтиленовой трубы получены значения скорости потока v , м/с, и расходы Q , м³/с, при уклонах 0.005–0.03 и различных значениях наполнения h/d . На рис. 14 показана взаимосвязь между средней скоростью, расходом и наполнением трубы в интервале $h/d = 0.1$ до $h/d = 0.8$, полученными в результате стендовых испытаний полиэтиленовой трубы. Так, например, при уклоне $i = 0.01$ и наполнении $h/d = 0.6$ скорость 1.042 м/с (расход 0.00512 м³/с) превышает минимально рекомендуемую величину для трубы диаметром 100 мм. (СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Таблица 2).

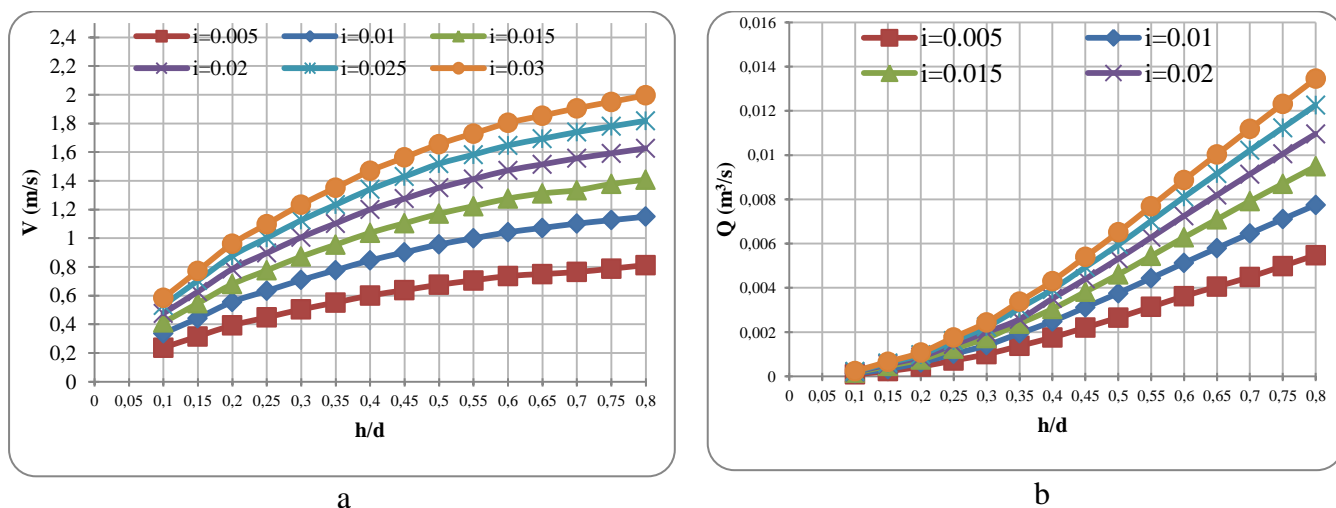


Рис. 14. Иллюстрация взаимосвязи между скоростью (а) и расходом (б) при изменении наполнения в трубе в интервале от 0.1 до 0.8

Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными традиционными методами и программой SewerCAD для безнапорных труб из полиэтилена

Для моделирования гидравлического режима в безнапорном трубопроводе использовалась программа SewerCAD. Это дало возможность моделировать течение воды по трубе. Проведены расчеты гидравлических характеристик потока в полиэтиленовой трубе при различных уклонах с учетом наполнения h/d в пределах 0.1 – 0.8. Сравнение средних скоростей, рассчитанных при различных расходах, экспериментальным, программным и традиционным методами представлено на рисунке 15.

Из рисунка 15 видно, что скорость потока в эксперименте, программе и традиционных методах результаты практически идентичны.

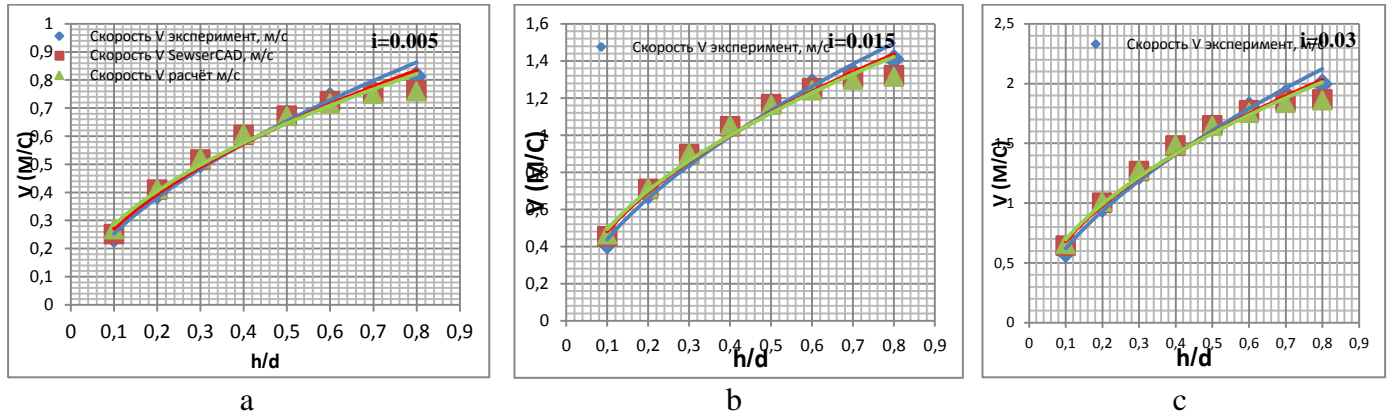


Рис. 15 Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными традиционными методами и программой SewerCAD.

Из рисунка видно, что скорость потока воды в эксперименте, программе и традиционных методах практически идентичны.

Определение гидравлических характеристик потока в безнапорной и комбинированной системе подачи воды с помощью программы SewerCAD

Основными причинами использования напорной системы являются сочетание топографии, геологии и стоимости. Поэтому рассматривалось использование комбинированной системы (напорной и безнапорной) при транспортировке очищенных сточных вод.

Объектом исследования в данной главе являются гидравлические характеристики потока в безнапорном PVC и стеклопластик GRP диаметром 1000мм и 1800 мм. Результаты программы трубы PVC диаметром 1800 мм и трубы стеклопластик GRP 1800 мм при различном заполнении трубы приведены на рис. 16.

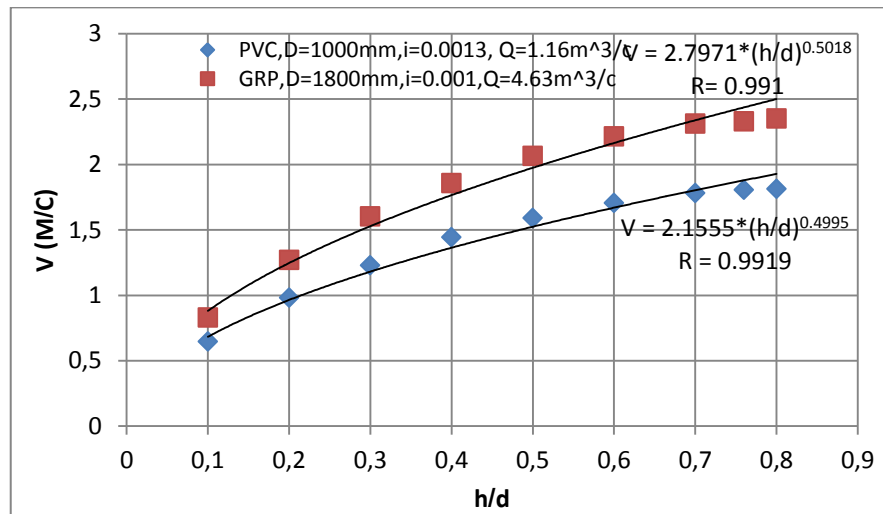
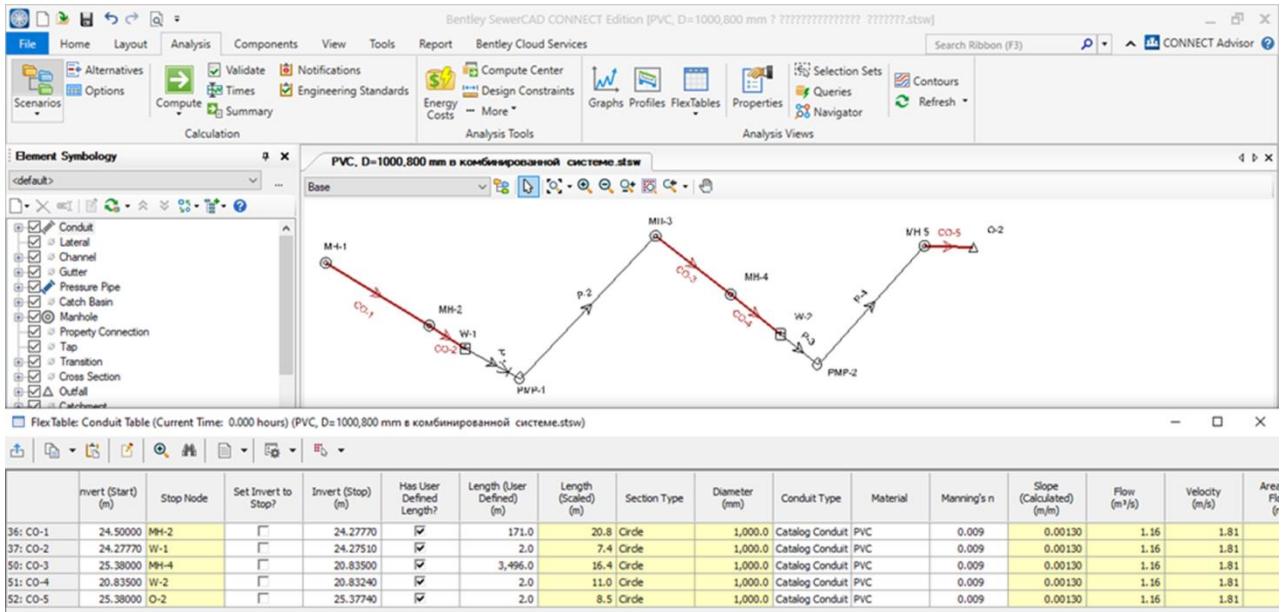
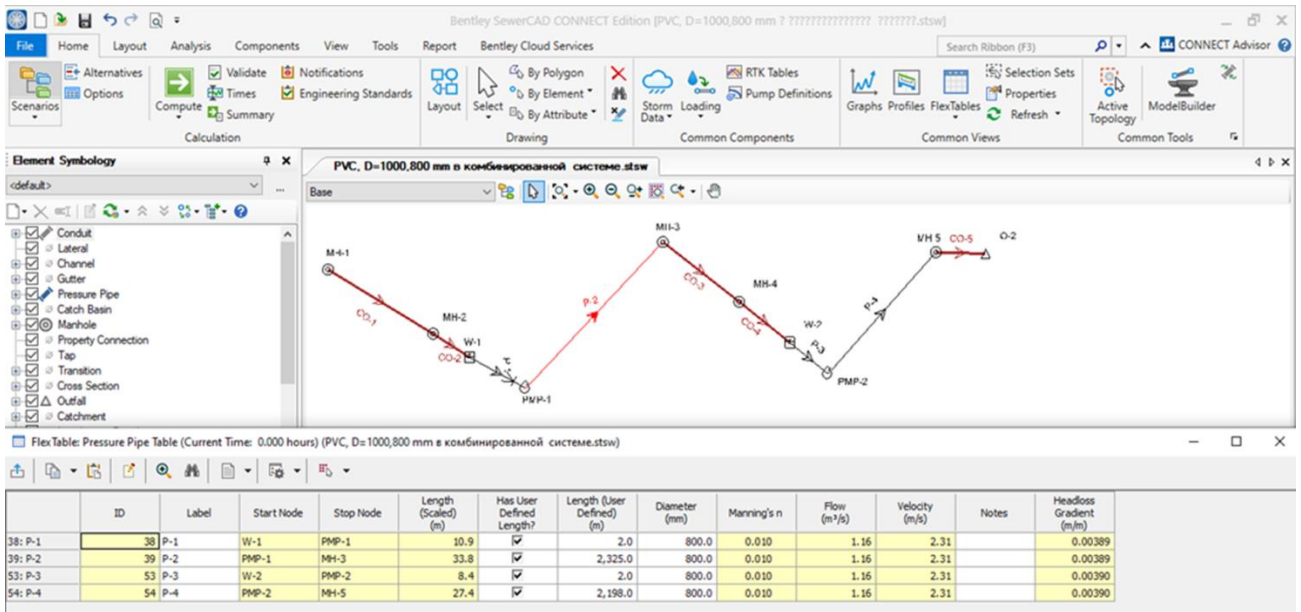


Рис. 16 Иллюстрация зависимости между скоростью потока и наполнением трубы в интервале от 0.1 до 0.8.

На рис. 17 показана комбинированная система транспортировки очищенных сточных вод с трубой PVC диаметром 1000 мм.



a.



b.

Рис. 17 Имитационная комбинированная модель в программе SewerCAD (a) результаты модели с трубой PVC диаметром 1000 мм для безнапорной системы (b) результаты модели с трубой PVC диаметром 800 мм для напорной системы.

Выполнены расчеты комбинированной системы (напорной и безнапорной) подачи воды с программой SewerCAD. Сравнение вариантов подачи воды между напорной и комбинированной системой в таблице 3.

Таблица 3 Сравнение вариантов подачи воды между напорной и комбинированной системой

Диаметр, мм	Стоимость эксплуатации трубы Пластик (\$/1 м.год)	Длина трубы, м	Общая стоимость эксплуатации (\$/год)	% снижение эксплуатационных расходов ежегодно
Первый вариант				
800	31.9	8200 (напорной система)	265580	45.6%
800	31.9	4527 (комбинированной системы)	144411.3	
Второй вариант				
1600	59.8	8200 (напорной система)	490360	44.7%
1600	59.8	4527 (комбинированной системы)	270714.6	

Из таблицы видно, что снижение эксплуатационных расходов ежегодно почти на 45 % ниже при подаче воды по комбинированной системе трубопроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены аналитические исследования по использованию очищенных сточных вод, подаваемые на мелиорированные земли в городе Кербела. В результате использования очищенных сточных вод дефицит воды снизится в среднем на 54.6% от общего водопотребления на сельскохозяйственные нужды.
2. Получены соответствующие зависимости потери напора между формулами Дарси-Вейсбаха и Хазена-Вильяма для четырех типов труб. Коэффициент корреляции между обеими формулами оказался равным 0.99 для всех материалов труб. Формула Хазена-Вильяма имеет ограничения в применении по виду жидкости и температуре, только для воды, температурой до 30 °С и турбулентного режима. Кинематическая вязкость воды, которая влияет на коэффициент гидравлического сопротивления и на число Рейнольдса, зависит от температуры. В административном округе Кербела температура колеблется от 0 °С до 47 °С. В то время как формула Дарси-Вейсбаха является универсальной для всех видов жидкости и применимо во всех диапазонах скоростей, температур, шероховатости и числа Рейнольдса, поэтому формула Дарси-Вейсбаха является более точной, чем формула Хазена-Вильяма.
3. Определены оптимальные диаметры и материалы труб в напорной системе подачи воды при двух вариантах расхода. Установлено, что диаметр трубы 800 мм из пластика является

оптимальным для первого варианта, а диаметр 1600 мм из стеклопластика GRP – оптимальным для второго варианта.

4. Получены значения потери напора и коэффициента гидравлического сопротивления для напорных труб из различных материалов. Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными с использованием традиционных методов и программного обеспечения WaterCAD V8i для напорной системы, показали, что потери напора, коэффициенты гидравлического сопротивления близки по значениям. В программе WaterCAD V8i и традиционных методах зафиксированы более высокие значения этих параметров для стальной трубы диаметром 100 мм с полимерным покрытием и ниже для полиэтиленовой трубы диаметром 100 мм. Результаты проведенной работы позволяют сделать вывод о возможности ее широкого использования на практике для определения гидравлических характеристик потока в трубопроводе.

5. Получены значения средней скорости потока при различной степени наполнения и уклонах для безнапорной трубы. Установлено, что значения скоростей потока, полученные в эксперименте, традиционным методом и с помощью программы SewerCAD практически идентичны.

6. Получены соответствующие зависимости для ряда гидравлических параметров (потери напора и коэффициента гидравлических сопротивлений) между результатами эксперимента и программой WaterCAD V8i для напорной системы, а также зависимости средней скорости потока от наполнения между результатами эксперимента и программой SewerCAD для безнапорной системы.

7. Выполнены расчеты комбинированной системы (напорной и безнапорной) подачи воды с программой SewerCAD. Сравнение вариантов подачи воды между напорной и комбинированной системой подачи воды показывает снижение эксплуатационных расходов ежегодно на 45 % ниже при транспортировании воды по комбинированной системе трубопроводов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективным направлением для исследований является совершенствование используемых программных обеспечений при определении потерь напора с различными коэффициентами шероховатости и гидравлических параметров потока.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в журналах, рецензируемых ВАК:

1. Джумагулова Н. Т., Абдуламир Л. С. А. Разработка гидравлической модели использования очищенных сточных вод для орошения в административном районе Карбель в Ираке // Инновации и инвестиции. 2021. № 2. с. 187-192.

2. Абдуламир Л. С. А., Джумагулова Н. Т. Техничко-экономическое обоснование стоимости транспортировки сточных вод для ирригационных целей в административном округе Кербела (Ирак) // Строительство: наука и образование. 2021. Том 11. № 3. С 151-165.

3. Абдуламир Л. С. А., Джумагулова Н. Т. Техничко-экономическое обоснование выбора параметров труб и системы транспортировки сточных вод для орошения на примере административного города Кербела (Ирак) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 4 (49). С. 81-89.

4. Абдуламир Л.С., Орлов В. А. Джумагулова Н.Т. Гидравлический эксперимент на безнапорном трубопроводе из полимерного материала // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 4. С. 487-500.

5. Абдуламир Л. С., Джумагулова Н. Т. Применение методов моделирования для исследования потерь напора в системе подачи воды на орошение // Гидротехническое строительство. 2022. № 7. С. 6-11.

6. Лейс С. А., Орлов В.А., Джумагулова Н.Т. Гидравлические исследования напорных труб из различных материалов // Вестник МГСУ.2022. № 9. С. 1218-1230.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных (Scopus):

7. Layth Saeed Abdulameer, Dzhumagulova Nazira Tentimishovna, Hayder Algretawee, Zhuravleva Larisa Anatolievna, Musa Al-Shammari. Comparison between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations to calculate head loss through conveyancing treated wastewater in Kerbala city, Iraq // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.-2022.- № 1-115. С.36-43.

Публикации в других изданиях:

8. Dzhumagulova N.T., L S Abdulameer. Use of Treated Waste Water in the Administrative District of Kerbala (Iraq) for Irrigation Purpose // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1067 (2021) 012011. P.1-10 DOI:10.1088/1757-899X/1067/1/012011

9. Джумагулова Н.Т., Абдуламир Лейс Саид Абдуламир. Использование очищенных сточных вод в административном округе Кербел Ирака для ирригационных целей // Сборник тезисов докладов III Всероссийского научно-практического семинара «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». 2020. С.89-90.

10. Лейс С.А., Орлов В.А., Джумагулова Н.Т. Гидравлические исследования напорных Труб из различных материалов // В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов V Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2022. С. 95.