Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

Научные записки
НИЦ МКВК

№36 2026

Ж.Х. Ишанов

Экспериментальное исследование влияния уклона и начального давления на потери напора в трубопроводах капельного орошения с некомпенсированными капельницами



Ж.Х. Ишанов

Экспериментальное исследование влияния уклона и начального давления на потери напора в трубопроводах капельного орошения с некомпенсированными капельницами

Введение

Общая площадь орошаемых посевных площадей в странах Центральной Азии составляет 10,0–10,5 млн гектаров [9]. В связи с ежегодным сокращением объёма водных ресурсов, необходимых для орошения этих площадей, эффективное и рациональное использование имеющихся водных ресурсов становится одной из актуальных задач современности. Особенно в условиях изменения климата ограниченность водных ресурсов требует повышения эффективности использования воды в сельском хозяйстве.

В целях смягчения данной ситуации в странах Центральной Азии особое внимание уделяется внедрению водосберегающих технологий орошения. В частности, в Республике Узбекистан масштабы внедрения водосберегающих технологий орошения выше по сравнению с другими странами Центральной Азии. В Казахстане также проводится широкомасштабная работа по внедрению данных технологий. В результате анализа установлено, что в остальных странах Центральной Азии уровень внедрения водосберегающих технологий орошения значительно ниже [3].

Вместе с тем, несмотря на расширение масштабов внедрения водосберегающих технологий орошения, отдельные факторы, влияющие на эффективность их работы, на практике ещё недостаточно изучены. В частности, одним из важных вопросов является потеря давления по длине сети оросительных труб в системах капельного орошения и её влияние на равномерность распределения воды по площади[4].

Технология капельного орошения была усовершенствована и широко внедрена в практику в государстве Израиль. В данной технологии внутри оросительных труб устанавливаются специальные интегрированные капельницы, обеспечивающие подачу воды в виде капель. Капельницы оснащены специальными малыми затворами и взаимосвязаны с системой капельного орошения. Данные капельницы служат для равномерного распределения воды по длине трубопровода и обеспечения одинакового расхода воды, подаваемой через капельницы. В связи с тем, что данная технология требует значительных финансовых затрат, в Центральной

Азии, в частности в Республике Узбекистан, используются изделия, производимые в Китайской Народной Республике, Турции и непосредственно в стране [5].

В результате изучения внедрённых технологий на местах было установлено, что в некоторых системах капельного орошения имеются недостатки, связанные с расчётом потерь давления в сети трубопроводов. В таких случаях возникает значительная разница между показателями давления в начале и конце системы, в результате чего количество воды, подаваемой через капельницы, может распределяться по площади неравномерно. Это оказывает отрицательное влияние на развитие сельскохозяйственных культур и снижает возможность получения высокого урожая [8].

Актуальность исследования

При проектировании систем капельного орошения важное значение имеет точное определение потерь давления в сети трубопроводов. При этом необходимо учитывать длину и диаметр трубопровода, расход воды и другие гидравлические показатели. В отдельных случаях считается, что проблему можно решить за счёт увеличения начального давления. Однако на практике этот способ не всегда даёт ожидаемый результат и сам по себе является недостаточным.

Некоторые системы капельного орошения сооружаются на основе недостаточно проработанных проектов. Это связано с неполным выполнением гидравлических расчётов, а также с проведением проектных работ специалистами, не имеющими достаточных знаний в данной области.

В связи с этим актуальным является практическое и научное определение того, что потери давления, возникающие по длине оросительных труб, не зависят от начального давления в начале трубопровода, а также разработка решения данной проблемы.

Цель исследования

Определить независимость потерь давления по длине трубопровода от начального давления за счёт повышения давления в трубопроводе капельного орошения.

Задачи исследования

1. Анализ существующих методов гидравлического расчёта потерь давления в сети трубопроводов системы капельного орошения.

2. Графическое представление результатов практических исследований, проведённых при различных значениях давления в капельной оросительной трубе длиной 193 м.

3. Анализ графиков, построенных на основе результатов практических исследований, проведённых при различных значениях давления в капельной оросительной трубе длиной 193 м.

4. Сравнение результатов, полученных при различных значениях давления в капельной оросительной трубе длиной 193 м.

Методика исследования

Проведение практических и теоретических исследований по определению потерь давления в оросительных трубах системы капельного орошения на основе общепринятых в гидравлике методов, а также анализ и определение потерь давления по длине трубопровода и местных потерь давления.

Анализ существующих методик

При проектировании системы капельного орошения гидравлический расчёт выполняется на основе применяемых существующих методов. При движении воды по трубопроводам системы возникают потери давления по длине и вследствие местных сопротивлений. Для компенсации этих потерь давление насосного агрегата принимается более высоким, а в отдельных случаях мощность двигателя увеличивается до 30–40 % по сравнению с расчётным значением.

Выбор насосного агрегата с избыточным давлением может обеспечить требуемое давление в системе, однако приводит к увеличению расхода электроэнергии и эксплуатационных затрат. Поэтому при выборе насосного агрегата важное значение имеет точный расчёт потерь давления в сети капельного орошения.

Исходя из этого, проведён анализ методов расчёта потерь давления по длине оросительных труб и потерь давления, возникающих под влиянием местных сопротивлений в трубах системы капельного орошения.

1. Многие учёные и исследователи проводили научные исследования по гидравлическим расчётам трубопроводных систем. В них изучались определение потерь давления по длине трубопроводов и вследствие местных гидравлических сопротивлений, возникающих при движении воды в трубах, а также распределение расхода воды по длине трубопровода. В трубопроводных системах вода подаётся в трубопровод под давлением с помощью насосного агрегата, при этом вследствие сопротивления стенок труб и поворотов трубопровода возникают

гидравлические сопротивления. Эти сопротивления приводят к потерям давления, вследствие чего давление уменьшается по длине трубопровода.

Анализ литературных источников показал, что многие учёные проводили исследования гидравлических параметров напорных трубопроводных систем, преимущественно в период 1955–1980 годов. Исследуемые трубопроводы имеют цилиндрическую форму.

В 1955 году Дарси–Вейсбах предложил уравнение (1) для расчёта потерь давления по длине трубопровода [13, 18, 7]. Уравнение имеет следующий вид:

$$hl = \lambda \frac{l}{d} \frac{(\frac{Q}{\omega})^2}{2g} \quad (1)$$

где

hl – потеря давления воды по длине трубопровода, м;

λ – коэффициент сопротивления трению по длине трубопровода;

l – длина трубопровода, м;

d – внутренний диаметр трубопровода, м;

Q – расход воды в трубопроводе, м³/с;

ω – площадь живого сечения трубопровода, м²;:

g – ускорение свободного падения, м/с²;

При расчёте приведённой выше формулы (1) Дарси–Вейсбаха учитывается, что на практике только часть потока переходит в турбулентное состояние, а вблизи стенок трубопровода сохраняется тонкий слой ламинарного потока [14]. В таком случае отмечается, что коэффициент сопротивления трению по длине трубопровода **λ** выражается посредством уравнения Блазиуса [14].

Данное уравнение приведено ниже:

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{R_e^{0{,}25}} \quad (2)$$

где

$\mathbf{R_e}$ **–** число Рейнольдса

2. В системах капельного орошения широко применяются капельницы различной конструкции и с разными гидравлическими характеристиками. В частности, используются цилиндрические капельницы, устанавливаемые внутри и снаружи оросительных трубопроводов, в том числе капельницы без компенсации давления.

В научной литературе рассмотрены вопросы изменения расхода воды, потерь напора вследствие гидравлических сопротивлений, а также методы их расчёта в трубопроводах капельного орошения. Вместе с тем влияние начального напора на его распределение и потери по длине трубопровода с капельницами без компенсации давления изучено не в полной мере.

В связи с этим представляет интерес проведение экспериментальных исследований для оценки распределения напора и его потерь по длине трубопровода при различных значениях начального напора.

В работе [12,19] отмечается, что для расчёта неравномерного распределения давления во многих случаях используется формула (Hazen–Williams).

$$h_f = \frac{K \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} D^{4,871}} \quad (3)$$

где:

h_f – потери напора по длине трубопровода, м.

K — эмпирический коэффициент, K = 0,0837;

C – коэффициент Шези.

Для расчёта потерь напора h_f при неравномерном движении воды по длине $\boldsymbol{l}$ трубопровода капельного орошения А. Гиллеспи (A. Gillespie) предложил следующую формулу:

Для расчёта потерь напора h_f при неравномерном движении воды по длине $\boldsymbol{l}$ оросительного трубопровода A. Gillespie предложил следующую формулу:

$$h_f = \left[1 - (1 - \frac{l}{L})^{2.852}\right] \cdot \Delta \cdot h \quad (4)$$

В источнике [13] для определения неравномерного распределения давления при установившемся равномерном движении воды предложена следующая формула:

$$h_f = \frac{Q_H^2}{K_H^2} \quad (5)$$

В работе [5] для определения неравномерного распределения давления в оросительных трубопроводах предложено следующее выражение:

$$h_f = a(b-n)\frac{L_I \cdot \vartheta^{1,75}}{\mathrm{D}^{1,25}} \quad (6)$$

где:

a и b постоянные безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние капельниц на движение воды в оросительном трубопроводе;

n — количество капельниц, шт.;

L — длина трубопровода капельного орошения, м;

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода капельного орошения диаметром 16 мм по его длине используется зависимость, приведённая в источнике [14]:

$$\lambda = \frac{2,017}{Re^{0,20}} \quad (7)$$

3. Кроме того, в работе [4, 2] подчёркивается, что при гидравлическом расчёте трубопроводов капельного орошения необходимо учитывать их диаметр, а также тип и рабочие параметры насоса, обеспечивающего подачу воды в систему. Для определения диаметра трубопровода приведена следующая формула:

$$\mathrm{d}=\sqrt[2]{\frac{Q}{\pi * v}} \quad (8)$$

где

d – диаметр трубопровода, м;

Q – расход воды, м³/с;

v – скорость движения воды в трубопроводе, м/с;

π – математическая постоянная, $\pi \approx 3,14$.

5. Для оценки потерь давления в системах капельного орошения исследования проводились А.Е. Новиковым, М.И. Ламсковой, В.А. Моториной и В.В. Некрасовой. В их исследованиях анализировалось изменение потерь давления в зависимости от

материала и конструкции труб, основных гидравлических параметров и условий эксплуатации [7]. Надёжная и эффективная работа системы, прежде всего, зависит от равномерного распределения давления воды по сети трубопроводов. Для расчёта потерь давления по длине капельной оросительной трубы рекомендуется использовать следующее математическое выражение [5]:

$$h_l \frac{l}{K^2} (Q_{\text{тр}}^2 + Q_{\text{тр}} Q_{\text{пт}} + \frac{1}{3} Q_{\text{пт}}^2) \quad (9)$$

где:

Q_{mp} = 0 га.

h_l – падение напора по всей длине поливного трубопровода, *м*:

Q_{mp} – транзитной расход, *л/с*:

Q_{nm} – путевой расход, *л/с* :

K_2 – расходный модуль трубопровода, *м³/с.*

Из приведённого выше анализа можно установить, что одним из первоначальных подходов к выполнению гидравлических расчётов в напорных трубопроводах является разработанное Дарси–Вейсбахом в 1845 году [17] уравнение для расчёта потерь давления по длине трубопровода. Ф. А. Шевелев в 1973 году [15] на основе проведённых исследований разработал уравнение для определения коэффициента сопротивления трению по длине трубопровода и сформировал на его основе табличные данные.

Вопросы исследования гидравлических процессов в трубопроводах, в том числе определения и расчёта потерь напора, рассматривались в работах зарубежных учёных V.F. Bralts, V.A. Gillespie, H.M. Gitlin, A. Hazen, L. Juana, D. Karmeli, J. Keller, A. Losada, L. Rodríguez-Sinobas, G.S. Williams и I.-P. Wu, а также учёных стран СНГ М.И. Ламсковой, В.А. Моторина, В.В. Некрасовой и А.Е. Новикова. В их исследованиях особое внимание уделялось оценке потерь напора по длине трубопроводов. При гидравлическом расчёте трубопроводов капельного орошения также применяется эмпирическая формула Хейзена-Уильямса (Hazen–Williams).

В работах О.Б. Имамназарова, Ш.О. Имомназарова и Ш.Т. Рустамова наряду с гидравлическим расчётом трубопроводов капельного орошения рассмотрено влияние режима работы насосного оборудования на расход воды и давление в системе.

Преимущество указанных выше методик заключается в том, что при расчёте потерь давления в трубопроводах коэффициент сопротивления трению по длине трубопровода λ можно определять с использованием таблиц Шевелева. Это упрощает выполнение гидравлических расчётов и обеспечивает удобство расчётного процесса.

Вместе с тем данная методика имеет определённые ограничения. В настоящее время в системах капельного орошения в основном используются трубы, изготовленные из полиэтилена и других полимерных материалов. Различия в технологии производства труб, составе материала, состоянии внутренней поверхности и конструктивных особенностях могут оказывать влияние на их гидравлическое сопротивление. Кроме того, применение в капельных оросительных трубах капельниц различной конструкции и гидравлических характеристик влияет на особенности распределения расхода воды и давления по длине трубопровода. В связи с этим при использовании коэффициентов сопротивления трению, приведённых в таблицах Шевелева, необходимо учитывать фактические конструктивные и эксплуатационные особенности капельных оросительных труб.

Вместе с тем в существующих исследованиях недостаточно изучена зависимость потерь давления в капельных оросительных трубах от начального давления в начале трубопровода, а также её влияние на распределение давления по длине трубопровода.

Материалы и методы исследования

Недостаточная изученность данного вопроса применительно к гидравлическому расчёту и проектированию трубопроводов капельного орошения местного производства указывает на необходимость проведения дополнительных исследований. В связи с этим в Научно-исследовательском институте ирригации и водных проблем (ранее САНИИРИ) были проведены экспериментальные исследования влияния начального давления на распределение давления по длине трубопровода капельного орошения, а также изменения потерь давления по длине трубопроводов с некомпенсированными капельницами.

Исследования проводились на капельной поливной трубке производства компании «Agro Drip» длиной 193 м, наружным диаметром 16 мм, толщиной стенки 1 мм и внутренним диаметром 14 мм. Внутри трубки через каждые 50 см установлены капельницы цилиндрической формы без компенсации давления. Исследования проводились при уклоне местности i = –0,00455 и различных значениях начального давления с целью определения изменения давления по длине поливной трубки.

Процесс проведения исследования был организован следующим образом: к магистральному трубопроводу была подключена распределительная труба диаметром 75 мм и длиной 52 м, к которой были подключены 18 оросительных труб. На 50-м метре распределительной трубы была подключена оросительная труба длиной 193 м. Для определения потерь давления на 193-метровой длине капельной оросительной трубы она была разделена на три контрольных участка: начальный, средний и конечный. Манометры были установлены на расстояниях 0,20; 90 и 193 м от начала трубы. После открытия подачи воды из магистрального трубопровода в распределительную трубу началось исследование. Схема проведения исследования приведена на рисунке 1.

Как отмечалось выше, капельная оросительная труба, на которой были установлены манометры, была разделена на три участка, а её общая длина составила 193 м. В ходе исследования все капельные оросительные трубы, подключённые к распределительной трубе, находились в полностью открытом состоянии. Распределение давления по длине оросительной трубы длиной 193 м представлено на рисунке 2.

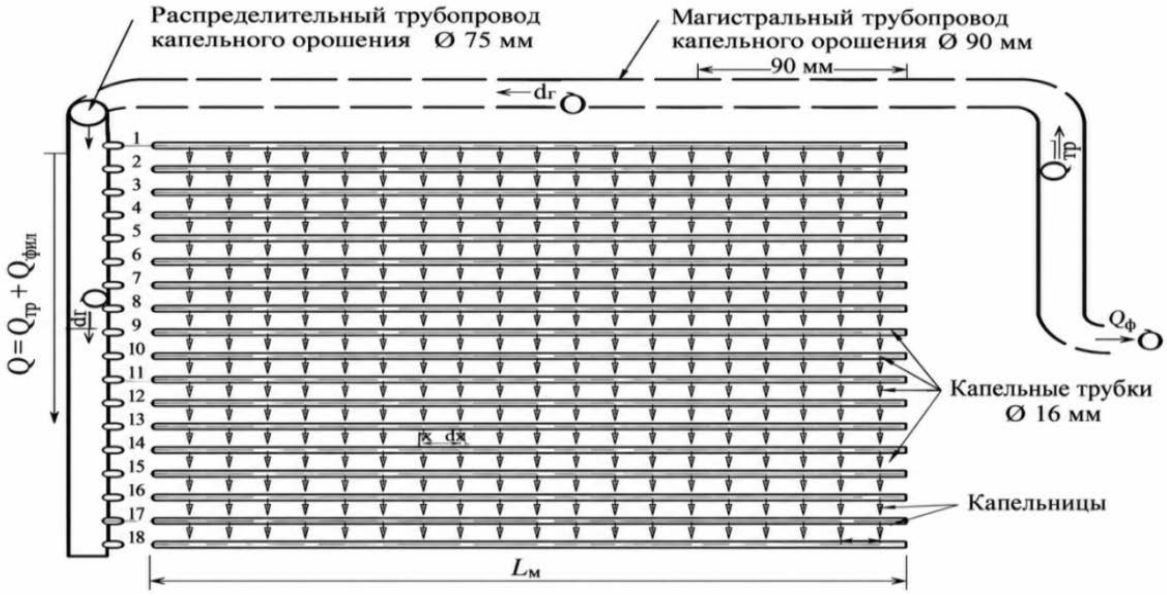


Рис. 1. Схема распределения давления воды по длине капельных оросительных труб

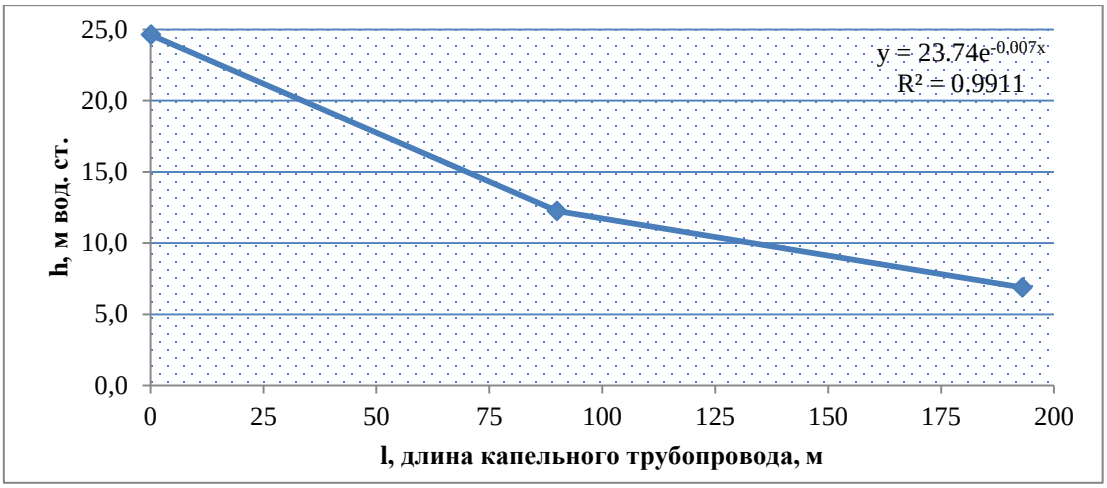


Рис. 2. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При полностью открытом состоянии оросительной трубы, когда давление в начальной части трубы длиной 193 м составляло 24,6197 м водяного столба, потери давления по длине трубы составили 17,7423 м водяного столба. На основе графика, приведённого на рисунке 2, получено эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы:

$$h = 23{,}74\, e^{-0{,}007l}, \text{ м} \qquad (10)$$

где:

h– Давление по длине трубопровода, м.
e– Число Эйлера (*e* = 2,71828).
l– Длина трубопровода, м.

На рисунке 3 приведён график распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 2.

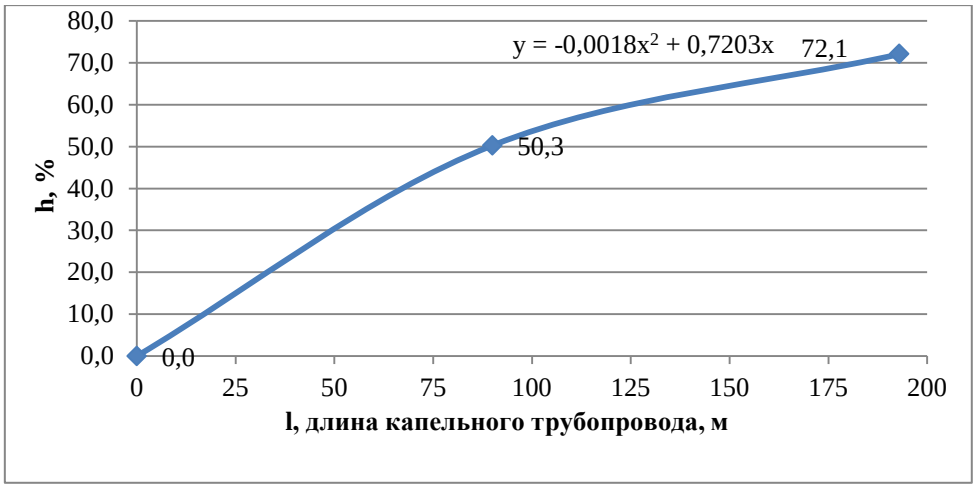


Рис. 3. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 3, в результате исследований установлено, что потеря давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляет 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,3 %, а на расстоянии 193 м 72,07 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0018l^2 + 0.7203l \qquad (11)$$

Один из поливных трубопроводов, подключённых к распределительному трубопроводу, был закрыт. Распределение давления по исследуемому поливному трубопроводу длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 4.

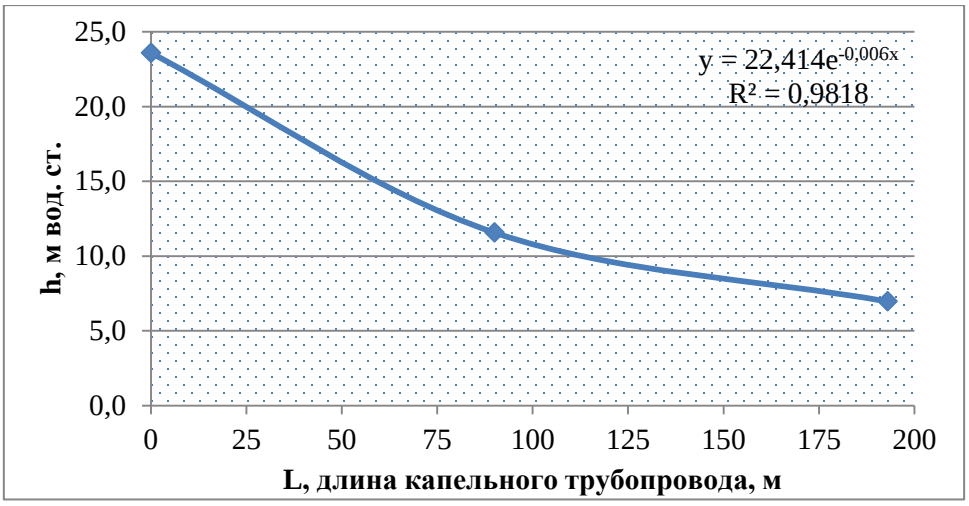


Рис. 4. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии одного краника в оросительной трубе, когда давление в начальной части трубы длиной 193 м составляло 23,5703 м водяного столба, потери давления по длине трубы составили 16,6121 м водяного столба.

На основе графика, представленного на рисунке 4, определено эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, которое имеет следующий вид:

$$h = 22{,}414\, e^{-0{,}006l} \qquad (12)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 4, приведён на рисунке 5.

Как видно из графика, представленного на рисунке 5, потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %. В результате исследований установлено, что на расстоянии 90 м потери давления составляют 41,1 %, а на расстоянии 193 м 70,48 %.

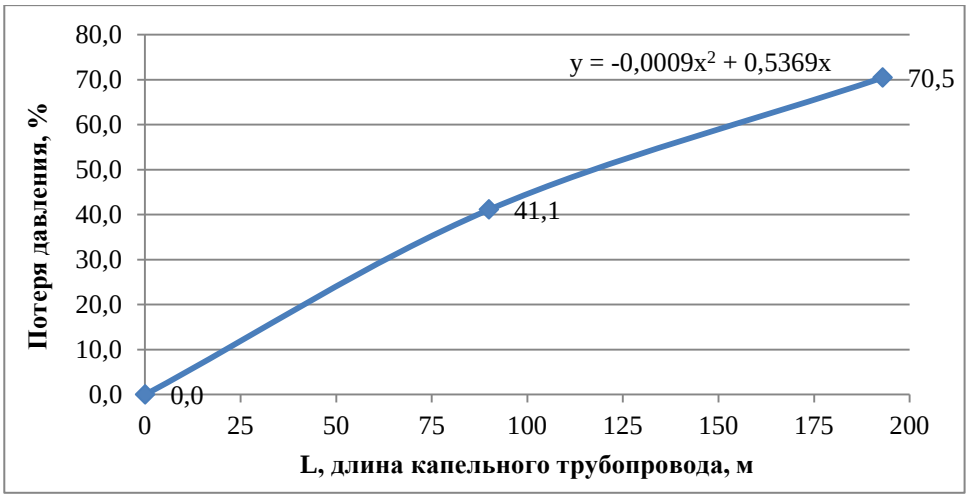


Рис. 5. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0009l^2 + 0.5369l \qquad (13)$$

Был закрыт 2-й поливной трубопровод на распределительном трубопроводе. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 6.

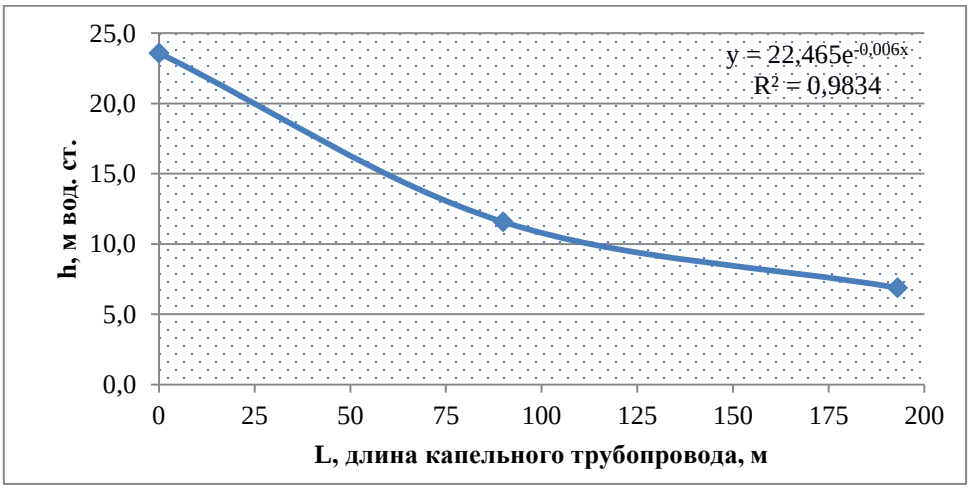


Рис. 6. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

На графике, представленном на рисунке 6, при закрытии 2 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,5793 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,6947 м водяного столба.

Данный график представляет эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, которое можно представить следующим образом:

$$h = 22{,}465\, e^{-0{,}006l} \tag{14}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 6, приведён на рисунке 7.

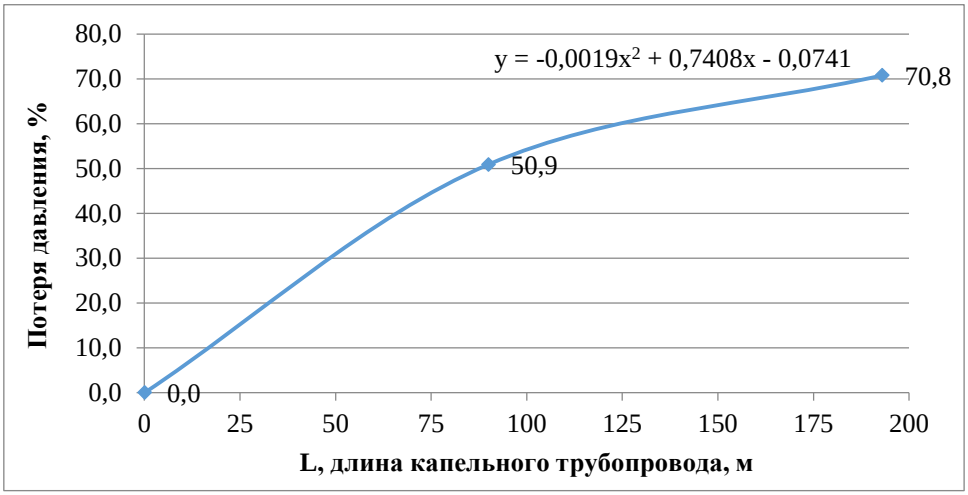


Рис. 7. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 7, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,1 %, а на расстоянии 193 м 70,80 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7408l - 0.0741 \tag{15}$$

Был закрыт 3-й поливной трубопровод на распределительном трубопроводе. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 8.

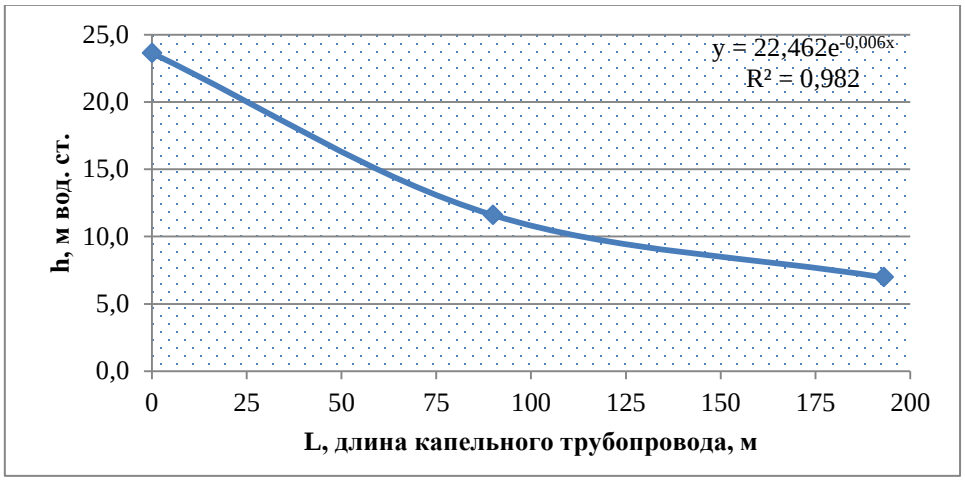


Рис. 8. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 3 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,6142 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,6455 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 8, выражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}462\, e^{-0{,}006l} \qquad (16)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 8, приведён на рисунке 9.

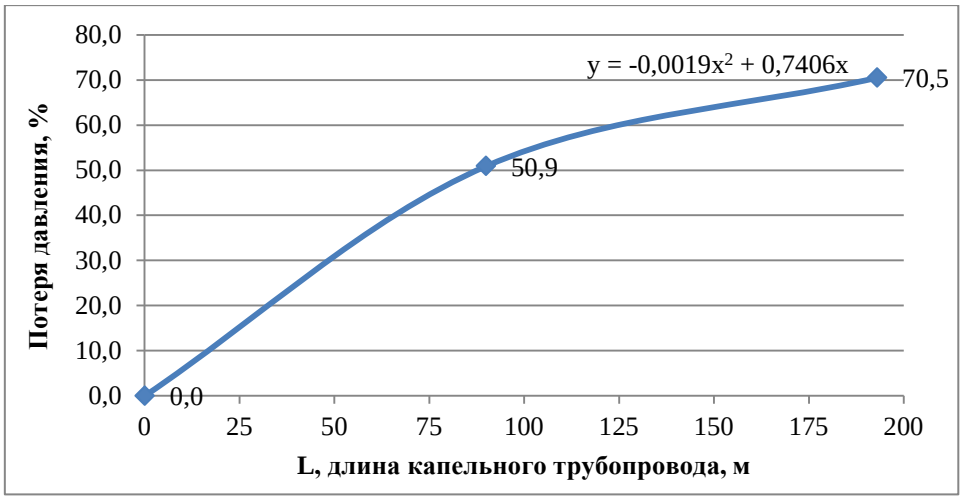


Рис. 9. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 9, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,9 %, а на расстоянии 193 м 70,5 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7406l \qquad (17)$$

Был закрыт 4-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 10.

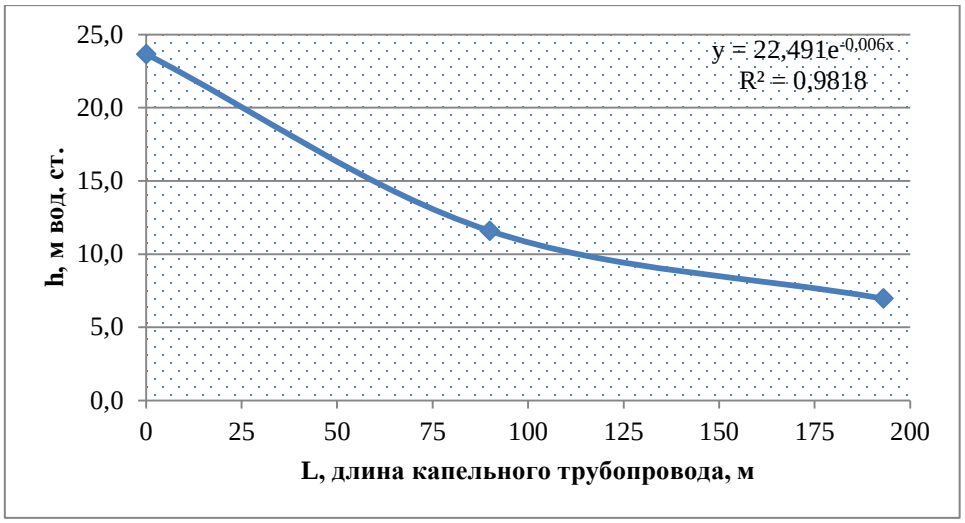


Рис. 10. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 4 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,6541 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,695 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 10, выражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}491\, e^{-0{,}006l} \tag{18}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 10, приведён на рисунке 11.

На графике, представленном на рисунке 11, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 51,0 %, а на расстоянии 193 м 70,6 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.002l^2 + 0.7428l \tag{19}$$

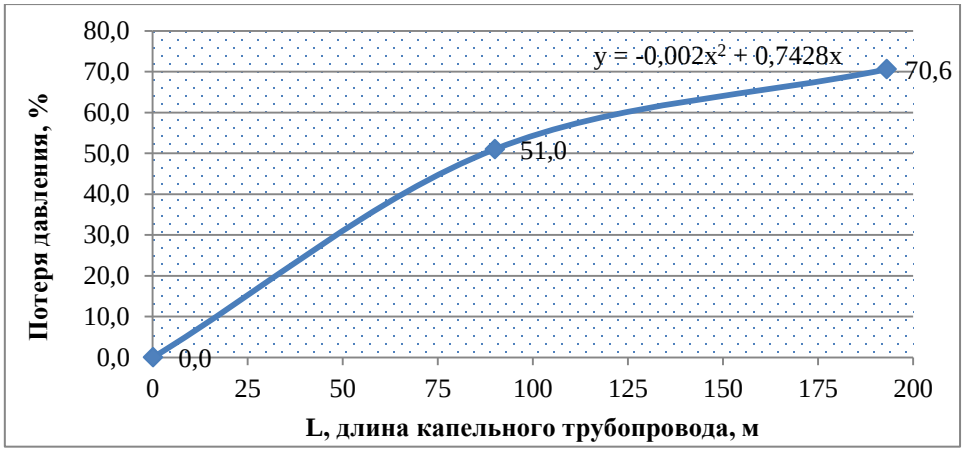


Рис. 11. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

Был закрыт 5-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 12.

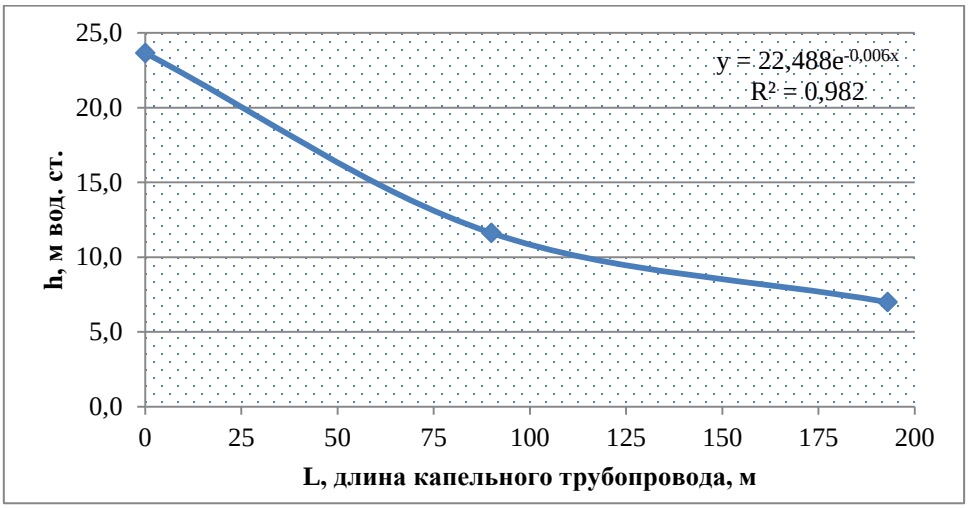


Рис. 12. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 5 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,6400 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,6545 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 12, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}488\, e^{-0{,}006l} \tag{20}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 12, приведён на рисунке 13.

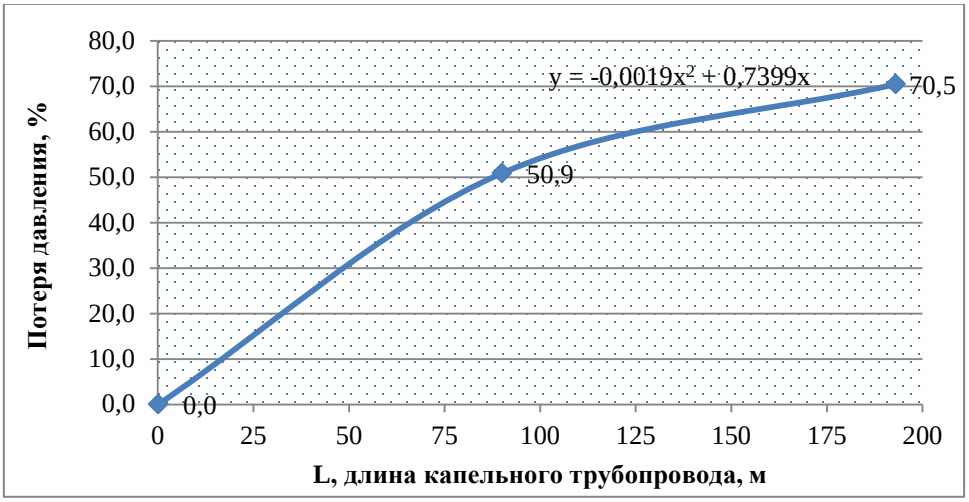


Рис. 13. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 13, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,1 %, а на расстоянии 193 м 70,45 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7399l \tag{21}$$

Был закрыт 6-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в

исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 14.

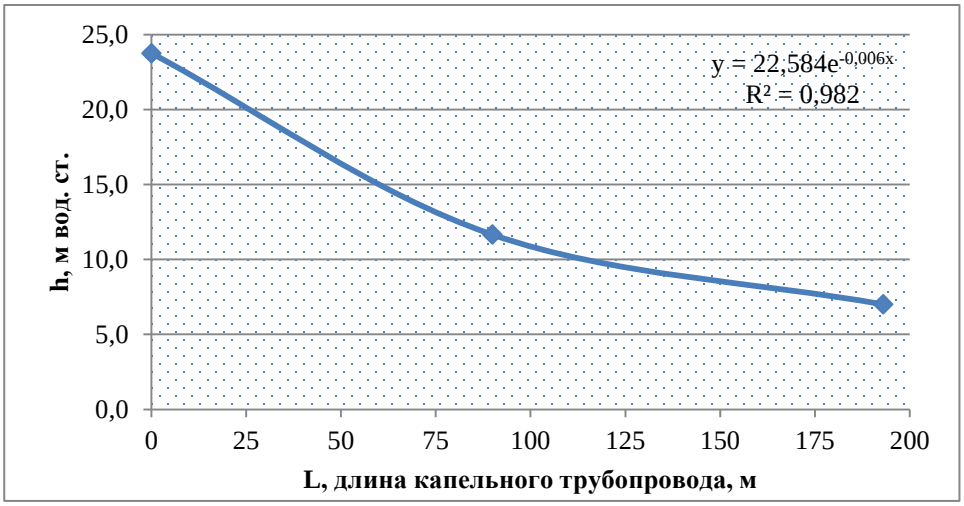


Рис. 14. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 6 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,7449 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,7433 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 14, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}584\, e^{-0{,}006l} \qquad (22)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 14, приведён на рисунке 15.

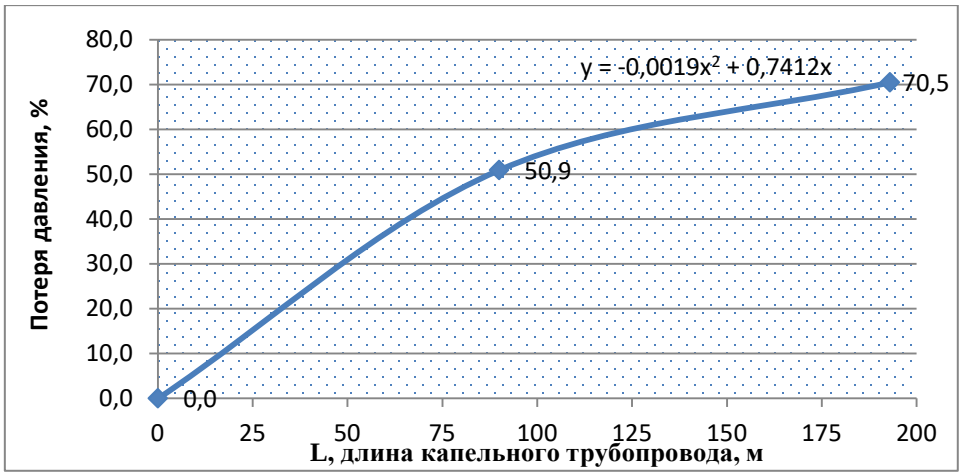


Рис. 15. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 15, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,9 %, а на расстоянии 193 м 70,51 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7412l \qquad (23)$$

Был закрыт 7-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 16

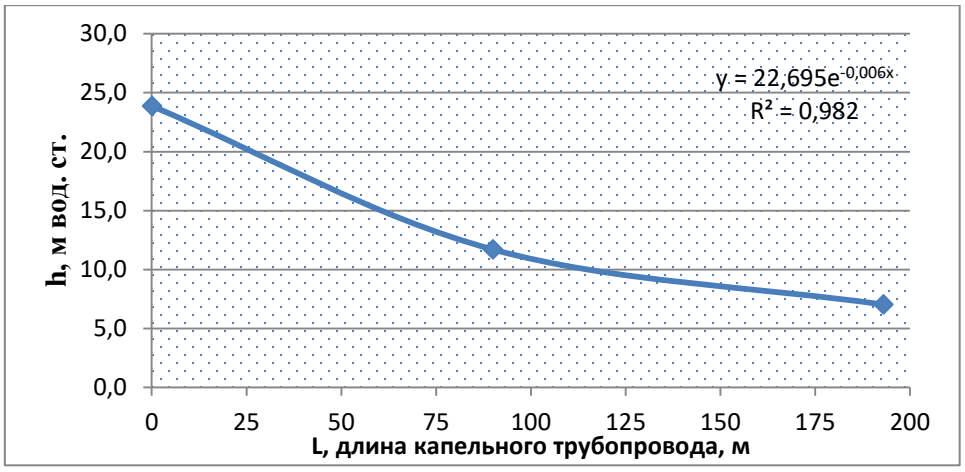


Рис. 16. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 7 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,8617 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,8387 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 16, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}695e^{-0{,}006l} \tag{24}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 16, приведён на рисунке 17.

На графике, представленном на рисунке 17, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 51,0 %, а на расстоянии 193 м 70,57 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом::

$$h = -0.0019l^2 + 0.7418l \tag{25}$$

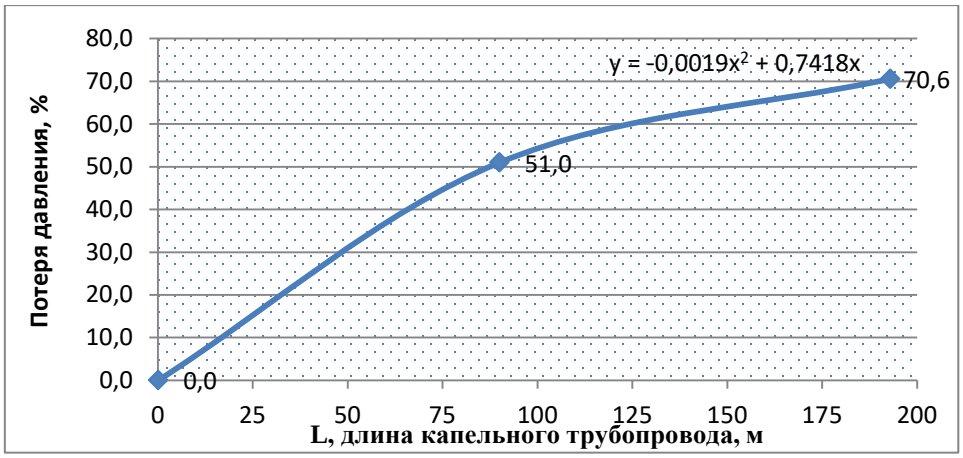


Рис. 17. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

Был закрыт 8-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 18.

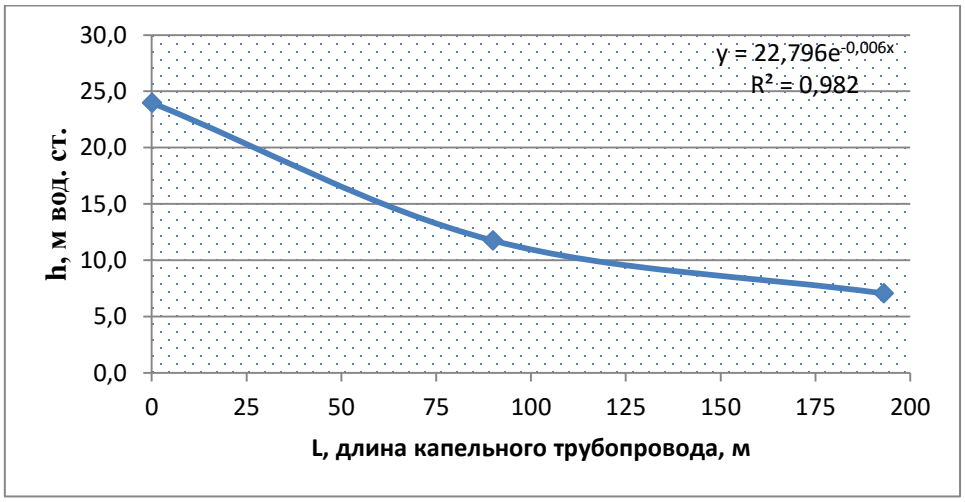


Рис. 18. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 8 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 23,9692 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,9097 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 18, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}796e^{-0{,}006l} \quad (26)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 18, приведён на рисунке 19.

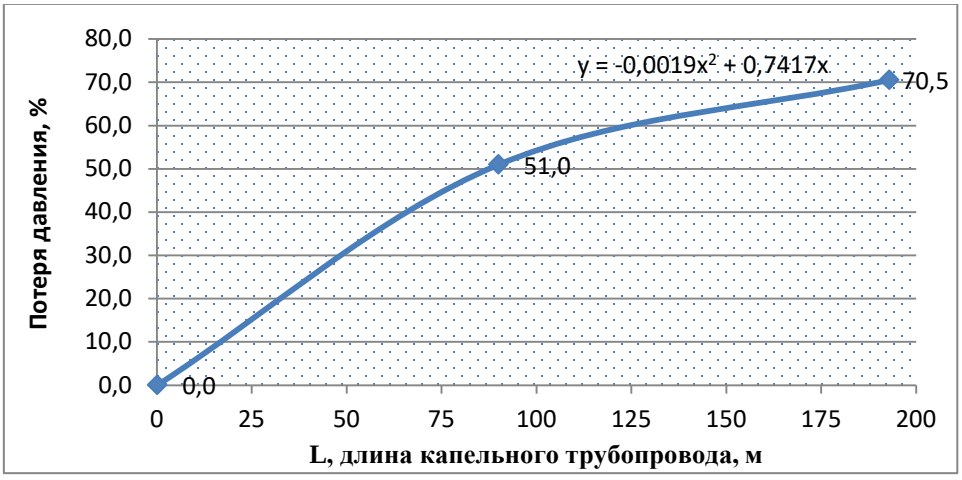


Рис. 19. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 19, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 51,0 %, а на расстоянии 193 м 70,55 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7417l \quad (27)$$

Был закрыт 9-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 20.

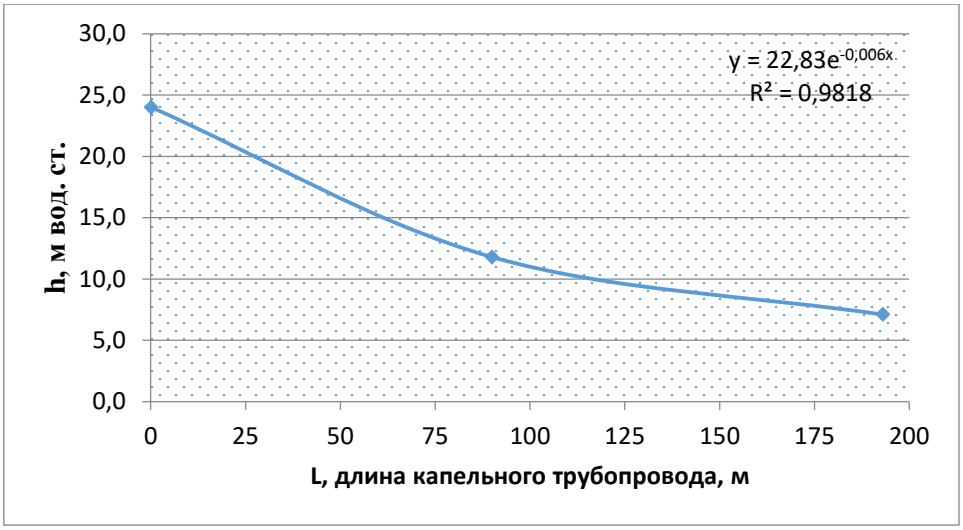


Рис. 20. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 9 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 24,0069 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,9070 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 20, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}83e^{-0{,}006l} \tag{28}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 20, приведён на рисунке 21.

На графике, представленном на рисунке 21, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,9 %, а на расстоянии 193 м 70,43 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7405l \tag{29}$$

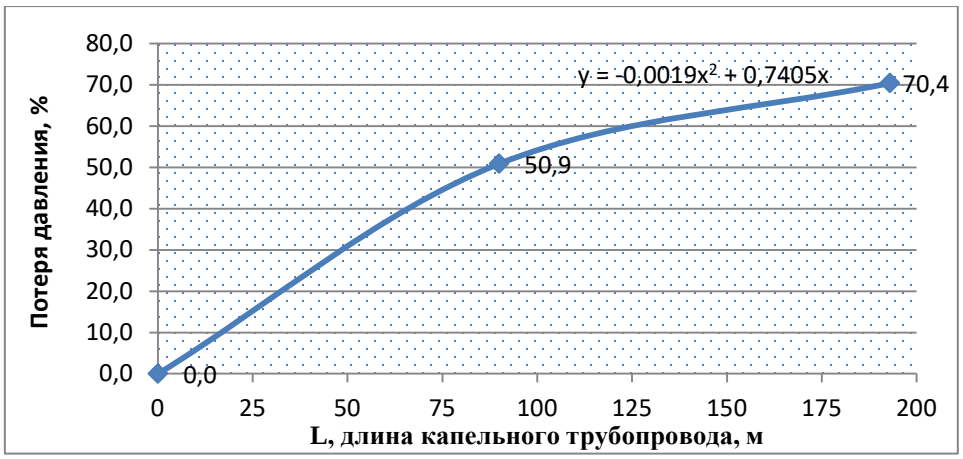


Рис. 21. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

Был закрыт 10-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 22.

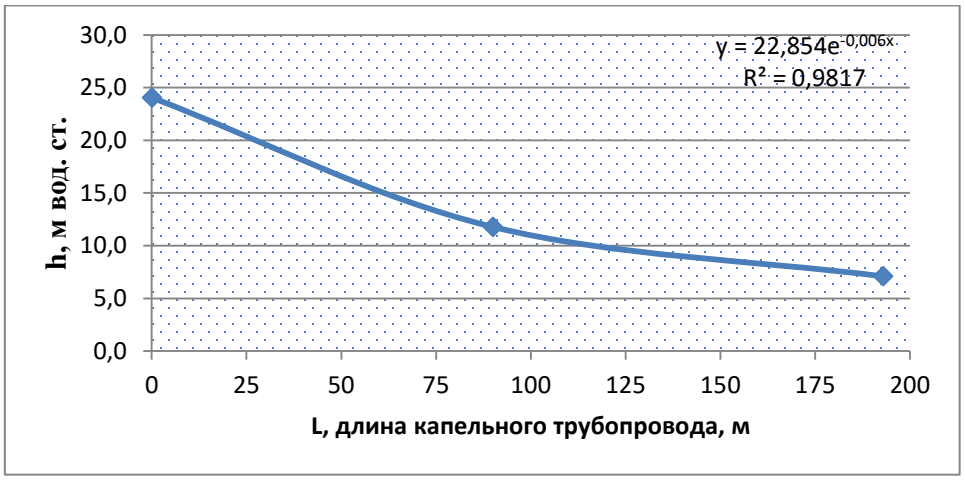


Рис. 22. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 10 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 24,0391 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 16,9477 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 22, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 22{,}854e^{-0{,}006l} \quad (30)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 22, приведён на рисунке 23.

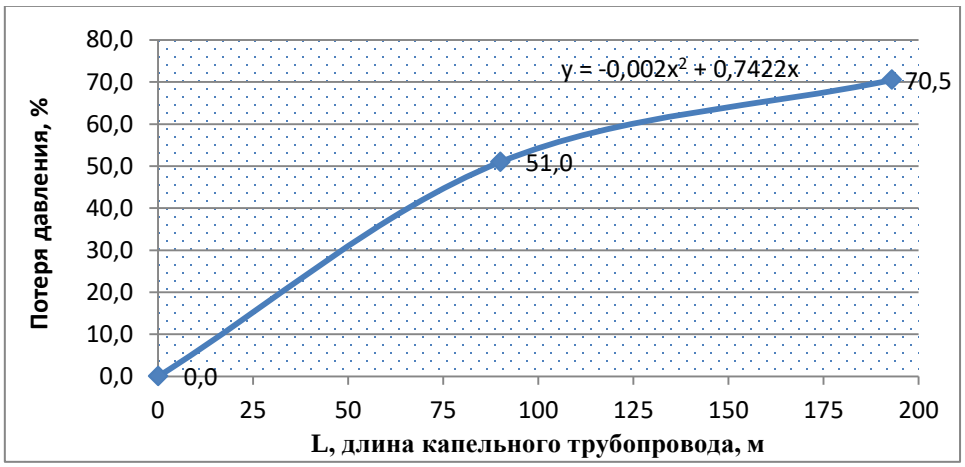


Рис. 23. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 23, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м – 51,0 %, а на расстоянии 193 м – 70,5 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.002l^2 + 0.7422l \quad (31)$$

Был закрыт 11-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в

исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 24.

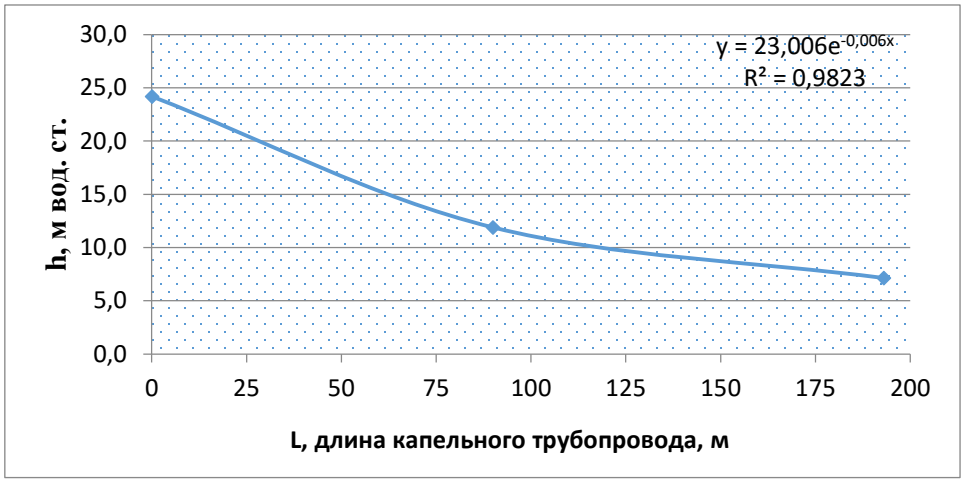


Рис. 24. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 11 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 24,1754 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 17,0353 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 24, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 23{,}006e^{-0{,}006l} \tag{32}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 24, приведён на рисунке 25.

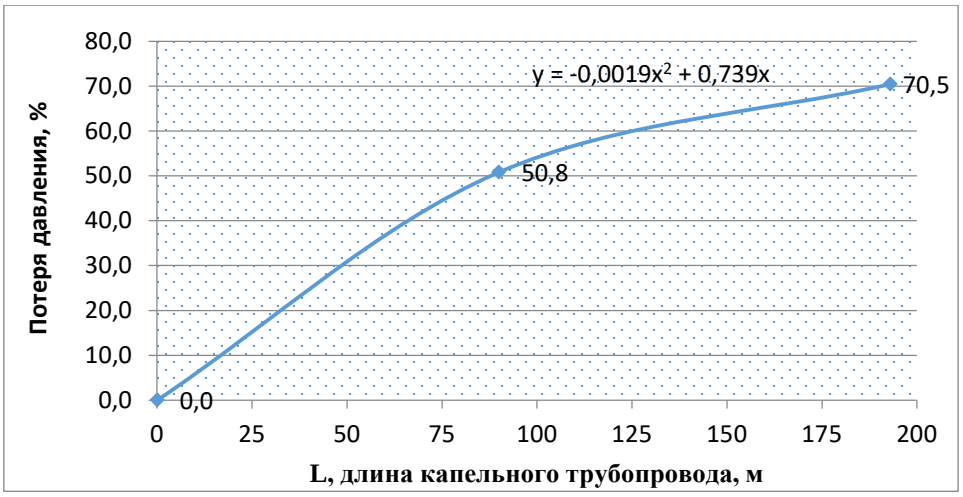


Рис. 25. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 25, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м – 50,8 %, а на расстоянии 193 м – 70,47 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.739l \qquad (33)$$

Был закрыт 12-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 26.

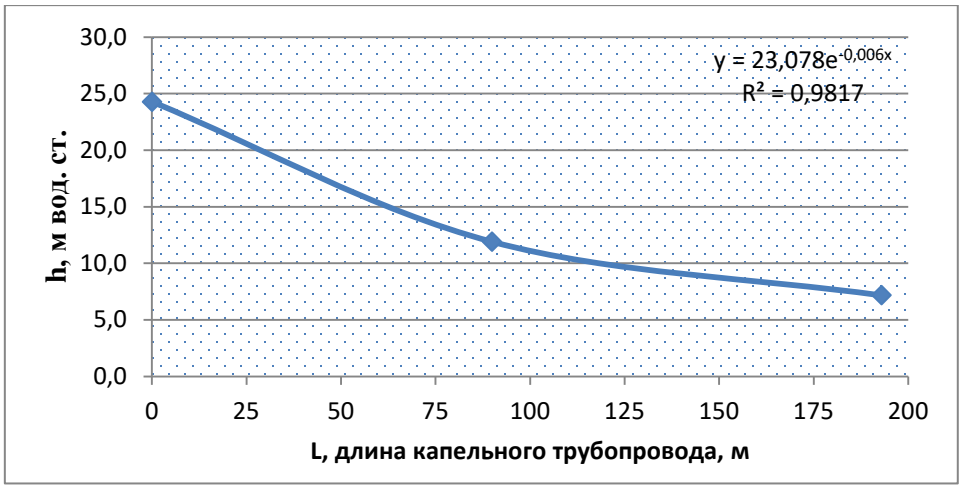


Рис. 26. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 12 кранников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 24,2724 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 17,1094 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 26, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 23{,}078e^{-0{,}006l} \tag{34}$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 26, приведён на рисунке 27.

На графике, представленном на рисунке 27, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м – 50,96 %, а на расстоянии 193 м – 70,49 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом::

$$h = -0.002l^2 + 0.7419l \tag{35}$$

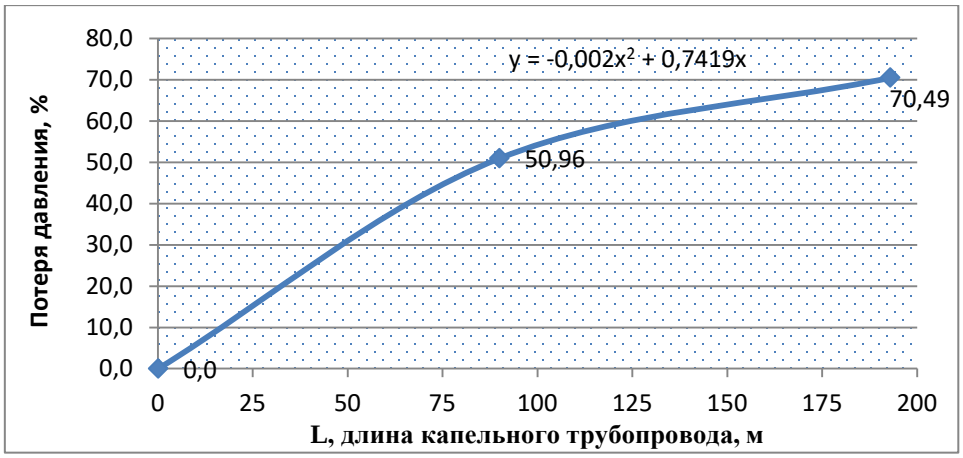


Рис. 27. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

Был закрыт 13-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 28.

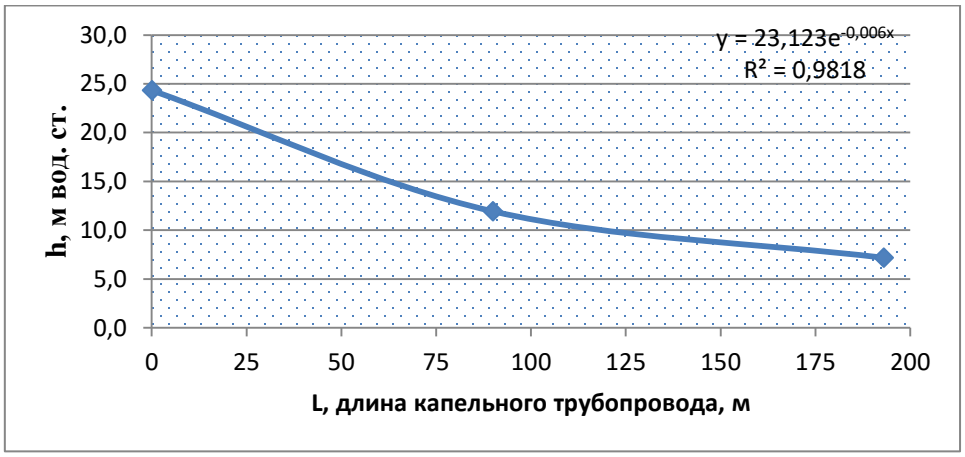


Рис. 28. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытии 13 краников в оросительной трубе давление в начальной части трубы длиной 193 м составило 24,3157 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубы составили 17,1330 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 28, отражает изменение давления по длине трубы и может быть представлен следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 23{,}123e^{-0{,}006l} \quad (36)$$

График распределения давления по длине трубы в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 28, приведён на рисунке 29.

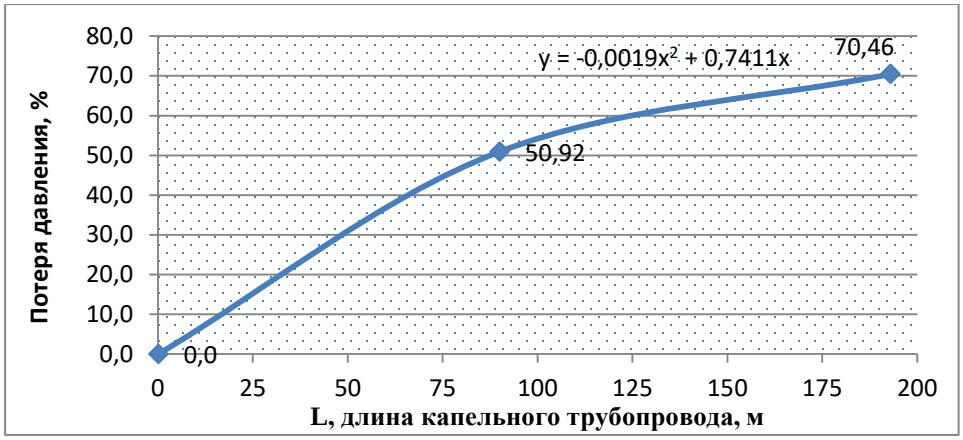


Рис. 29. Изменение распределения давления по длине капельной оросительной трубы в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 29, в результате исследований установлено, что потери давления по длине трубы на расстоянии 0,10 м составляют 0,0 %, на расстоянии 90 м 50,92 %, а на расстоянии 193 м 70,46 %.

Эмпирическое уравнение, выражающее изменение давления по длине трубы, представленное на данном графике, можно выразить следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0.7411l \quad (37)$$

Был закрыт 14-й поливной трубопровод, подключённый к распределительному трубопроводу. Распределение давления в исследуемом поливном трубопроводе длиной 193 м в закрытом состоянии представлено на рисунке 30.

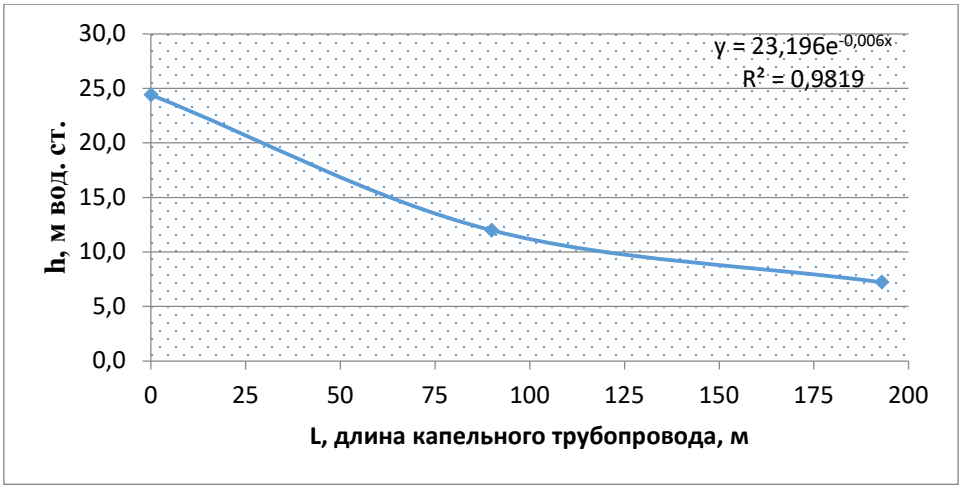


Рис. 30. Распределение давления по длине капельной оросительной трубы

При закрытых 14 краниках в оросительном трубопроводе давление в начальной части трубопровода длиной 193 м составило 24,3894 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубопровода составили 17,1804 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 30, характеризует изменение давления по длине трубопровода и описывается эмпирическим уравнением, которое можно представить следующим образом:

$$h = 20{,}58e^{-0{,}006l} \tag{38}$$

График показателей распределения давления по длине трубопровода в процентном выражении, представленных на рисунке 30, приведён на рисунке 31.

На графике, представленном на рисунке 31, установлено, что потери давления по длине трубопровода при расстоянии 0,10 м составили 0,0 %, на расстоянии 90 м – 50,88 %, а на расстоянии 193 м – 70,44 %.

Эмпирическое уравнение, характеризующее изменение давления по длине трубопровода, представленное на данном графике, может быть выражено следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0{,}7405l \tag{39}$$

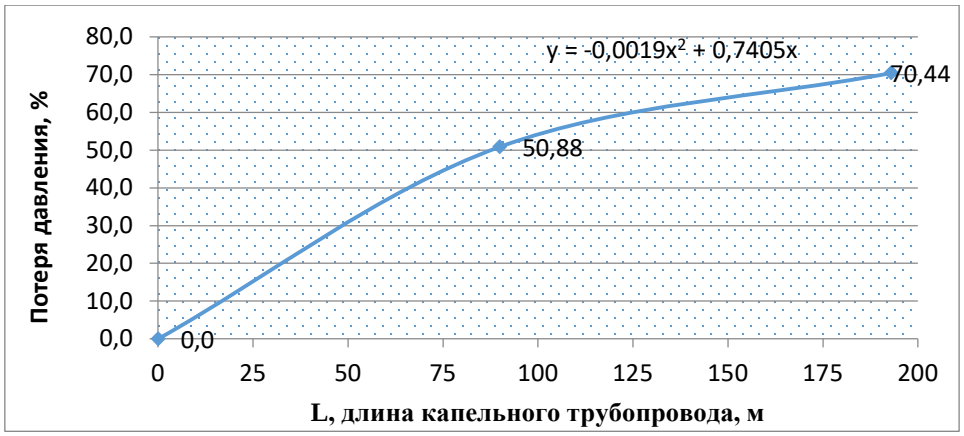


Рис. 31. Изменение распределения давления по длине трубопровода капельного орошения в процентном выражении

Была закрыта 15-я оросительная линия, подключённая к распределительному трубопроводу. Распределение давления по длине исследуемого оросительного трубопровода длиной 193 м при закрытом состоянии представлено на рисунке 32.

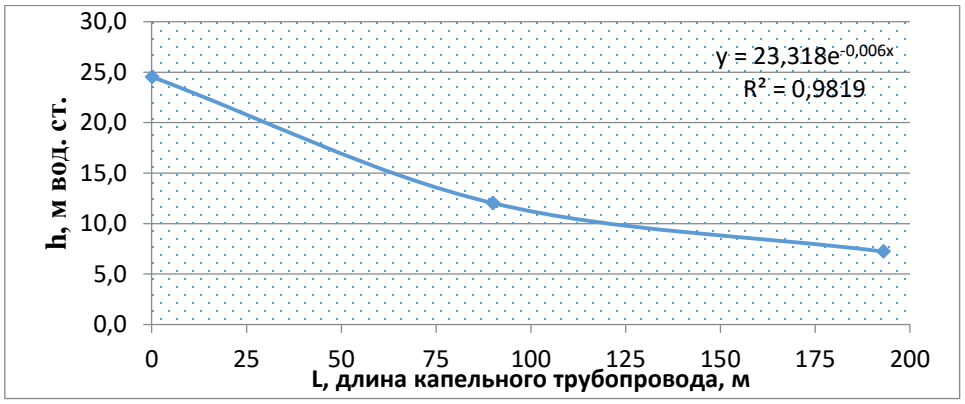


Рис. 32. Распределение давления по длине трубопровода капельного орошения

При закрытых 15 краниках в оросительном трубопроводе давление в начальной части трубопровода длиной 193 м составило 24,5193 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубопровода составили 17,2901 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 32, характеризует изменение давления по длине трубопровода и описывается эмпирическим уравнением, которое может быть представлено следующим образом::

$$h = 23{,}318e^{-0{,}006l} \quad (40)$$

График показателей распределения давления по длине трубопровода в процентном выражении, представленных на рисунке 32, приведён на рисунке 33.

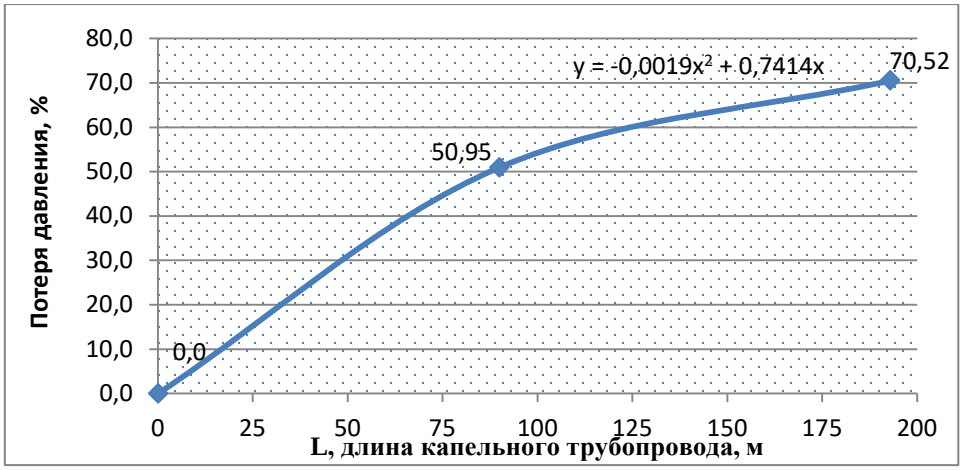


Рис. 33. Изменение распределения давления по длине трубопровода капельного орошения в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 33, по результатам исследования установлено, что потери давления по длине трубопровода на расстоянии 0,10 м составили 0,0 %, на расстоянии 90 м – 50,95 %, а на расстоянии 193 м – 70,52 %.

Эмпирическое уравнение, характеризующее изменение давления по длине трубопровода, представленное на данном графике, может быть выражено следующим образом:

$$h = -0.0019l^2 + 0{,}7414l \quad (41)$$

Была закрыта 16-я оросительная линия, подключённая к распределительному трубопроводу. Распределение давления по длине исследуемого оросительного трубопровода длиной 193 м при закрытом состоянии представлено на рисунке 34.

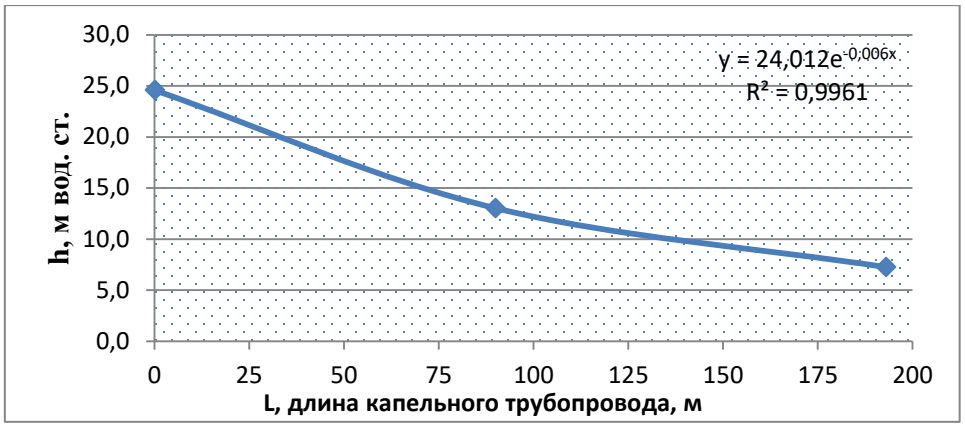


Рис. 34. Распределение давления по длине трубопровода капельного орошения

При закрытых 16 краниках в оросительном трубопроводе давление в начальной части трубопровода длиной 193 м составило 24,5670 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубопровода составили 17,3173 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 34, характеризует изменение давления по длине трубопровода и описывается эмпирическим уравнением, которое может быть представлено следующим образом:

$$h = 24{,}012e^{-0{,}006l} \tag{42}$$

График распределения давления по длине трубопровода в процентном выражении, соответствующий данным, представленным на рисунке 34, приведён на рисунке 35.

На графике, представленном на рисунке 35, по результатам исследования установлено, что потери давления по длине трубопровода на расстоянии 0,10 м составили 0,0 **%**, на расстоянии 90 м 47,0 %, а на расстоянии 193 м 70,49 %.

Эмпирическое уравнение, характеризующее изменение давления по длине трубопровода, представленное на данном графике, может быть выражено следующим образом:

$$h = -0.0015l^2 + 0{,}6593l \tag{43}$$

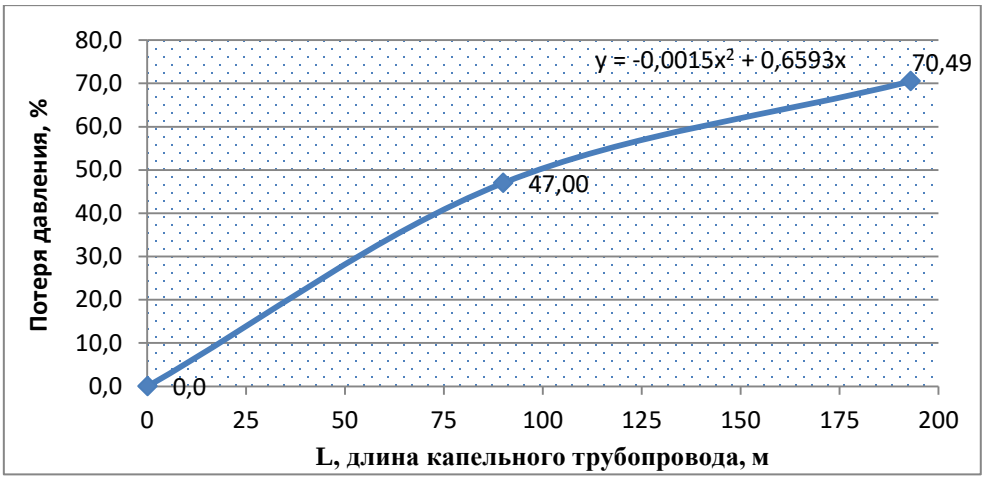


Рис. 35. Изменение распределения давления по длине трубопровода капельного орошения в процентном выражении

Была закрыта 17-я оросительная линия, подключённая к распределительному трубопроводу. Распределение давления по длине исследуемого оросительного трубопровода длиной 193 м при закрытом состоянии представлено на рисунке 36.

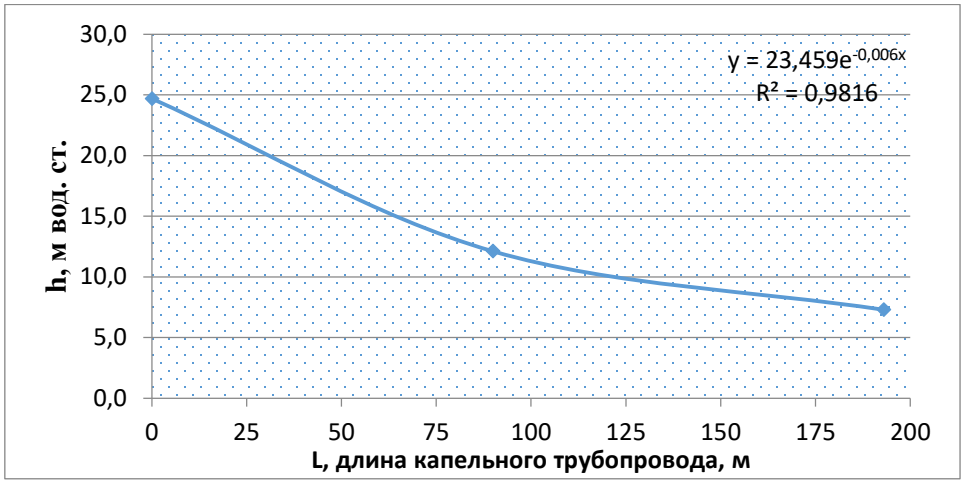


Рис. 36. Распределение давления по длине трубопровода капельного орошения

При закрытых 17 краниках в оросительном трубопроводе давление в начальной части трубопровода длиной 193 м составило 24,6752 м водяного столба. Общие потери давления по длине трубопровода составили 17,3915 м водяного столба.

График, представленный на рисунке 36, характеризует изменение давления по длине трубопровода и описывается эмпирическим уравнением, которое может быть представлено следующим образом:

$$h = 23{,}459e^{-0{,}006l} \quad (44)$$

График распределения давления по длине трубопровода в процентном выражении, соответствующий показателям, представленным на рисунке 36, приведён на рисунке 37.

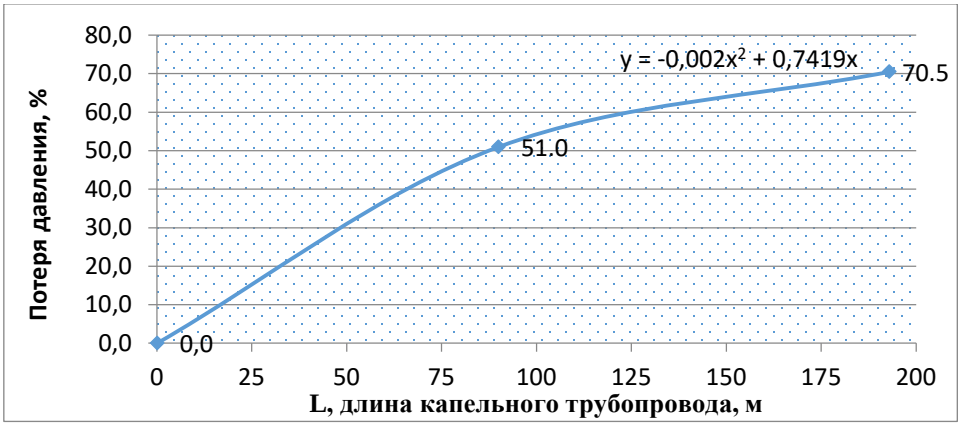


Рис. 37. Изменение распределения давления по длине трубопровода капельного орошения в процентном выражении

На графике, представленном на рисунке 37, по результатам исследования установлено, что потери давления по длине трубопровода на расстоянии 0,10 м составили 0,0 %, на расстоянии 90 м – 50,96 %, а на расстоянии 193 м – 70,48 %.

Эмпирическое уравнение, характеризующее изменение давления по длине трубопровода, представленное на данном графике, может быть выражено следующим образом:

$$h = -0.002l^2 + 0{,}7419l \quad (45)$$

Результаты и обсуждение исследования

Анализ рассмотренных выше научных работ показывает, что для расчёта потерь напора в трубопроводах применяется формула Дарси

Вейсбаха. При этом коэффициент гидравлического сопротивления по длине трубопровода λ определяется по формуле Блазиуса.

Для расчёта потерь напора по длине оросительных трубопроводов также используется эмпирическая формула Хейзена Уильямса (Hazen–Williams). В свою очередь, A. Gillespie предложил формулу для расчёта потерь напора h_f и разности напоров Δh при неравномерном движении воды в оросительных трубопроводах.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран трубопровод капельного орошения производства узбекского предприятия **«Agro Drip»**. Длина трубопровода составляет 193 м, наружный диаметр 16 мм, внутренний 15 мм. Внутри трубопровода через каждые 50 см установлены капельницы цилиндрической формы.

Эти капельницы не имеют специального механизма, поддерживающего постоянный расход воды при изменении давления. Капельницы внутри трубопровода создают дополнительное сопротивление движению воды, что приводит к увеличению потерь давления по его длине.

В связи с этим на данном трубопроводе с некомпенсированными капельницами были проведены экспериментальные исследования. Изучалось распределение давления по длине трубопровода, а также определялось, зависят ли потери давления от его начального значения.

На основании результатов практических исследований потери давления по длине трубопровода были проанализированы следующим образом:

На графике, представленном на рисунке 2, показано, что при полностью открытом состоянии 18 оросительных трубопроводов, подключённых к распределительному трубопроводу, потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,7423 м водяного столба (72,07 %).

На рисунке 4 представлены результаты при закрытом кранике 1-го оросительного трубопровода, подключённого к распределительному трубопроводу. При этом потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,6121 м водяного столба (70,48 %). По сравнению с полностью открытым состоянием данный показатель уменьшился на 1,1302 м водяного столба, или на 1,59 %.

На рисунке 6 представлены результаты при закрытом кранике 2-го оросительного трубопровода. Потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,6947 м водяного столба (70,80 %). В результате закрытия двух кранов потери давления по сравнению с

полностью открытым состоянием уменьшились на 1,0476 м водяного столба, или на 1,27 %.

На рисунке 8 представлены результаты при закрытом кранике 3-го оросительного трубопровода. Потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,6455 м водяного столба (70,49 %). При закрытии трёх кранико в, по сравнению с полностью открытым состоянием, потери давления уменьшились на 1,0968 м водяного столба, или на 1,58 %.

На рисунке 10 при закрытии кранико в 4 оросительных трубопроводов, подключённых к распределительному трубопроводу, потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,6695 м водяного столба (70,58 %). По сравнению с полностью открытым состоянием данный показатель уменьшился на 1,0728 м водяного столба, или на 1,49 %.

На рисунке 12 при закрытии кранико в 5 оросительных трубопроводов потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,6545 м водяного столба (70,45 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 1,0878 м водяного столба, или на 1,62 %.

На рисунке 14 при закрытии краника 6-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,7433 м водяного столба (70,51 %). По сравнению с полностью открытым состоянием данный показатель уменьшился на **0,9990 м водяного столба**, или на 1,56 %.

На рисунке 16 при закрытии краника 7-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,8387 м водяного столба (70,57 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,9040 м водяного столба, или на 1,50 %.

На рисунке 18 при закрытии краника 8-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,9097 м водяного столба (70,55 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,8326 м водяного столба, или на 1,52 %.

На графике, представленном на рисунке 20, при закрытии краника 9-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,9070 м водяного столба (70,43 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,8353 м водяного столба, или на 1,64 %.

На рисунке 22 при закрытии краника 10-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 16,9477 м водяного столба (70,50 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,7946 м водяного столба, или на 1,57 %.

На рисунке 24 при закрытии краника 11-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,0353 м водяного столба (70,47 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,7070 м водяного столба, или на 1,60 %.

На рисунке 26 при закрытии краника 12-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,1094 м водяного столба (70,49 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,6329 м водяного столба, или на 1,58 %.

На рисунке 28 при закрытии краника 13-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,1330 м водяного столба (70,46 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,6093 м водяного столба, или на 1,61 %.

На рисунке 30 при закрытии краника 14-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,1804 м водяного столба (70,44 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,5619 м водяного столба, или на 1,63 %.

На рисунке 32 при закрытии краника 15-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,2901 м водяного столба (70,52 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,4522 м водяного столба, или на 1,55 %.

На рисунке 34 при закрытии краника 16-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,3173 м водяного столба (70,49 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,4250 м водяного столба, или на 1,58 %.

На рисунке 36 при закрытии краника 17-го оросительного трубопровода потери давления по длине трубопровода на расстоянии 193 м составили 17,3915 м водяного столба (70,48 %). По сравнению с полностью открытым состоянием потери давления уменьшились на 0,3508 м водяного столба, или на 1,59 %.

В результате проведённого анализа установлено, что при поэтапном закрытии краников оросительных трубопроводов, подключённых к распределительному трубопроводу, изменение потерь давления по длине исследуемого трубопровода длиной 193 м не является значительным.

Результаты исследования показали, что в трубопроводе капельного орошения диаметром ø16 мм и длиной 193 м давление последовательно уменьшается по мере увеличения длины трубопровода. При полностью открытом состоянии давление в начальной части трубопровода снизилось с 24,6197 м водяного столба до 6,8774 м водяного столба в конечной части. Общие потери давления составили 17,7423 м водяного столба, что соответствует снижению на 72,07 % относительно начального давления.

Также установлено, что потери давления по длине трубопровода имеют нелинейный характер и изменяются по криволинейной зависимости. В начальной части трубопровода снижение давления происходит относительно интенсивно, тогда как по мере увеличения длины трубопровода скорость снижения давления уменьшается. В частности, на расстоянии 90 м потери давления при полностью открытом состоянии составили около 50,3 %, а на расстоянии 193 м достигли 72,07 %.

При поэтапном закрытии краников оросительных трубопроводов, подключённых к распределительному трубопроводу, начальное давление в исследуемом оросительном трубопроводе длиной 193 м изменялось в пределах 23,5703–24,6752 м водяного столба. При этом общие потери давления по длине трубопровода составляли 16,6121–17,3915 м водяного столба. Несмотря на определённые изменения абсолютной величины потерь давления при закрытии краников, их отношение к начальному давлению в основном сохранялось в пределах 70,43–70,57 %.

Полученные результаты показывают, что уменьшение количества одновременно работающих оросительных трубопроводов оказывает влияние на общее распределение давления в системе, однако относительная доля потерь давления изменяется незначительно. Данная закономерность представлена на рисунке 38.

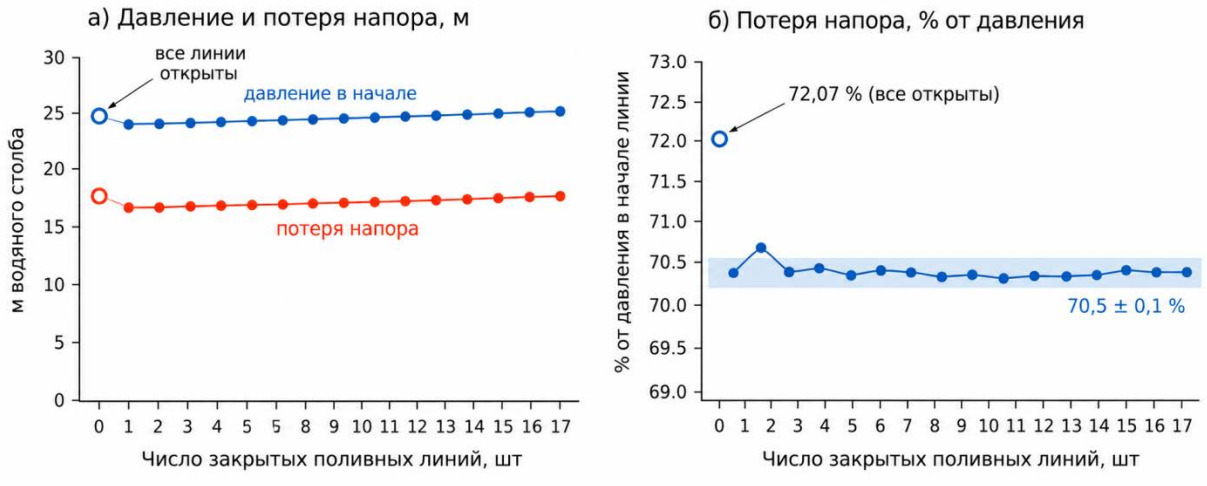


Рис. 38. Распределение потерь давления в трубопроводе капельного орошения в зависимости от изменения количества оросительных трубопроводов

При всех 18 открытых поливных линиях потери напора составили 72,07 % от начального напора. При последовательном закрытии от 1 до 17 поливных линий относительные потери напора сохранялись на уровне около 70,5 %.

Согласно ГОСТ ИСО 9261–2004, пункт 9.2.3 разница между расходом воды в начальной и конечной частях трубопровода капельного орошения не должна превышать 10 %. Кроме того, в пункте 9.2,2 данного документа отмечается связь равномерности распределения расхода воды со стабильностью давления по длине трубопровода [19]. Исходя из этого, в настоящем исследовании потеря давления по длине трубопровода, не превышающая **10 %**, была принята в качестве допустимого критерия для оценки равномерности распределения расхода воды.

На приведённых выше графиках представлены результаты экспериментальных исследований, проведённых при последовательном закрытии от 1 до 17 кранов. Средние значения показателей давления, полученные в ходе этих исследований, приведены в таблице 1.

Экспериментальные исследования проводились на трубопроводе капельного орошения производства предприятия «Agro Drip», расположенного в Республике Узбекистан. Длина трубопровода составляла **193 м**, наружный диаметр **16 мм**, внутренний диаметр 14 мм, толщина стенки 1 мм. Внутри трубопровода через каждые 50 см установлены капельницы цилиндрической формы. Исследования проводились при уклоне местности i = –0,00455 и различных значениях начального напора.

Таблица 1

Закрыто линий	H, м (0,0 м)	H, м (90 м)	H, м (193 м)	Потеря напора, м	Потеря, % от H нач.
Среднее значение при последовательном закрытии от 1 до 17 кранов.	24,067	11,873	7,076	16,992	70,60

Полученные результаты показали, что в условиях проведённых исследований изменение начального напора не обеспечило полного возмещения потерь напора по длине трубопровода. При этом потери напора превышали принятый 10 %-ный критерий. В связи с этим для уменьшения потерь напора было принято решение продолжить исследования при меньшей длине оросительного трубопровода.

Для дальнейших исследований длина трубопровода была сокращена до 150 м, а уклон местности составлял i = –0,00613. По результатам измерений напор в начальной точке трубопровода составил 22,6108 м вод. ст., а на расстоянии 150 м 8,1291 м вод. ст. Таким образом, общие потери напора по длине трубопровода составили 14,4817 м вод. ст., или 64,05 % от начального напора. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сокращение длины трубопровода	H, м (0,0 м)	H, м (90 м)	H, м (150 м)	Потеря напора, м	Потеря, % от H нач.
150 м	22.6108	9.5397	8.1291	14.4817	64.05

Поскольку в трубопроводе длиной 150 м потери напора также превышали принятый 10 %-й критерий, для их уменьшения длина трубопровода была сокращена до 100 м. Исследования продолжили при уклоне местности i = 0,00228.

По результатам измерений напор в начальной точке трубопровода составил 23,5516 м вод. ст., а в конечной точке, на расстоянии 100 м, 17,5431 м вод. ст. Таким образом, общие потери напора по длине трубопровода составили 6,0085 м вод. ст., или 25,51 % от начального напора. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сокращение длины трубопровода	Н, м (0,0 м)	Н, м (50 м)	Н, м (100 м)	Потеря напора, м	Потеря, % от Н нач.
100 м	23.5516	18.1323	17.543096	6.0085	25.51

Поскольку в трубопроводе длиной 100 м потери напора также превышали принятый 10 %-й критерий, для дальнейшего уменьшения потерь напора длина трубопровода была сокращена до 70 м. Исследования продолжили при уклоне местности i = 0,00228.

По результатам измерений напор в начальной точке трубопровода составил 24,1123 м вод. ст., а в конечной точке, на расстоянии 70 м, 21,5230 м вод. ст. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сокращение длины трубопровода	Н, м (0,0 м)	Н, м (50 м)	Н, м (70 м)	Потеря напора, м	Потеря, % от Н нач.
70 м	24.1123	21.5230	21.2987	2.81	10.74

Изменение показателей напора по длине трубопровода, приведённых в таблице 4, представлено графически на рисунке 39.

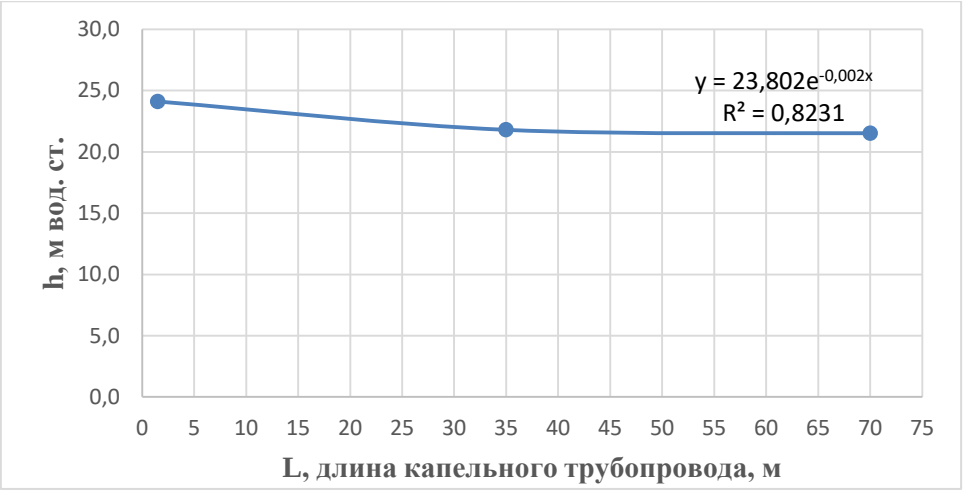


Рис. 39. Распределение напора по длине трубопровода капельного орошения

График, представленный на рисунке 39, отражает изменение напора по длине трубопровода и может быть описан следующим эмпирическим уравнением:

$$h = 23{,}802e^{-0{,}002L} \quad (45)$$

Как видно из рисунка 39, общие потери напора по длине трубопровода составили 2,5893 м вод. ст., или 10,74 % от начального напора.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при длине трубопровода 70 м и уклоне местности i = 0,00228 относительные потери напора составили 10,74 %, что значительно ниже значений, полученных при испытаниях трубопроводов длиной 193, 150 и 100 м.

Таким образом, в исследованных условиях сокращение длины трубопровода сопровождалось уменьшением потерь напора. При этом следует учитывать, что исследования проводились при различных уклонах местности, которые также могли повлиять на полученные результаты.

Фотография, сделанная в ходе проведения экспериментальных исследований, представлена на рисунке 40.



Рисунок 40. Процесс проведения экспериментальных исследований

Таким образом, в исследованных условиях при уклоне местности **i =** 0,00228 целесообразно принимать длину трубопровода капельного орошения производства предприятия «Agro Drip» равной 70,0 м**.** Трубопровод имеет наружный диаметр 16 мм**,** внутренний диаметр 14 мм**,** толщину стенки 1 мм и оснащён цилиндрическими капельницами, установленными через каждые 50 см.

По результатам экспериментальных исследований получены эмпирические уравнения для расчёта потерь напора по длине трубопровода капельного орошения производства предприятия «Agro Drip» длиной 193 м, с наружным диаметром 16 мм, внутренним диаметром 14 мм и толщиной стенки 1 мм. Внутри трубопровода через каждые 50 см установлены капельницы цилиндрической формы. Исследования проводились при уклоне местности i = –0,00455. Полученные уравнения позволяют определять абсолютную величину потерь напора, а также их процентное отношение к начальному напору.

Кроме того, для данного трубопровода длиной 70 м при уклоне местности i = 0,00228 также получены эмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать абсолютную величину потерь напора по длине трубопровода.

В ходе экспериментальных исследований был изучен только один тип трубопровода капельного орошения, выпускаемого отечественным предприятием «Agro Drip». Однако в настоящее время в Республике Узбекистан производятся также трубопроводы капельного орошения с наружными диаметрами 16 и 22 мм, в которых капельницы устанавливаются внутри трубопровода с различными интервалами. Кроме того, в садоводстве применяются поливные трубопроводы с наружным расположением капельниц, расстояние между которыми выбирается в зависимости от схемы посадки саженцев.

В связи с этим в дальнейшем планируется продолжить экспериментальные исследования на указанных типах трубопроводов капельного орошения. При проведении последующих исследований будут учтены замечания и недостатки, отмеченные при рассмотрении настоящей научной записки.

Использованная литература

1. Государственный комитет по делам строительства. (1986). Внутренний водопровод и канализация зданий (СНиП 2.04.01-85). Стройиздат.

2. Имамназаров, О. Б., Рустамов, Ш. Т., & Имомназаров, Ш. О. (2023). Томчилатиб суғориш тизими қувурларининг гидравлик ҳисоби. Proceedings of International Conference on Educational Discoveries and Humanities, *2*(12), 142–147. https://econferenceseries.com/index.php/icedh/article/view/3050

3. Ишанов, Ж. (2026). Методы водосбережения в ирригационных сетях в странах Центральной Азии (Аналитическая записка НИЦ МКВК № 14). https://cawater-info.net/library/rus/sic-icwc-policy-brief-14-2026.pdf

4. Ишанов, Ж.Х. (2022). Томчилатиб суғориш тизими қувуридаги беҳуда босим сарфини ўлчов асосида тажрибалар натижалари. In International Conference on Developments in Education Sciences and Humanities (Part 4, pp. 85–88).

5. Ишанов, Ж.Х. (2025). Рекомендации по внедрению в практику гидравлического расчета элементов системы капельного орошения. Научно-информационный центр МКВК. https://www.cawater-info.net/library/rus/watlib/watlib-28-2025.pdf

6. Ишанов, Ж. Х., Маҳмудов, Э. Ж., Ишанов, Х. Х., & Садиев, У. А. (2024). Томчилатиб суғориш тизими элементларини ҳисоблашнинг гидравлик усулларини такомиллаштириш. Voris-nashriyot.

7. Ишанов, Х., Саидов, М., Ишанов, Ж., & Эшонов, У. (2025). Сув тежовчи технологиялар тизимининг мандалли полиэтилен қувурлари гидравлик кўрсаткичларини лаборатория тадқиқотлари бўйича дастлабки натижалар. Irrigation and Melioration, *11*(3), 65–71. https://journals.tiiame.uz/IL/en/issue/download/6/6

8. Ишанов, Х., Саидов, М., Ишанов, Ж., & Эшонов, У. (2026). Sug‘oriladigan yerlar va suvdan oqilona foydalanishga doir ayrim masalalar. *O‘zbekiston agrar fani xabarnomasi*, (1[25]), 111–118.

9. Киселев, П. Г. (Ред.). (1974). Справочник по гидравлическим расчетам (5-е изд.). Энергия.

10. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. (2006). Оборудование сельскохозяйственное оросительное. Трубопроводы для полива. Технические требования и методы испытаний (ГОСТ ИСО 9261-2004; ISO 9261:1991, IDT). Стандартинформ.

11. Микитюк, А. В., Кажаров, В. М., & Шугай, П. Ю. (2005). Гидравлический расчет поливного полиэтиленового трубопровода системы капельного орошения. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, (13), 105–111.

12. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. (2010). Оросительные системы. Правила проектирования (ТКП 45-3.04-178-2009 [02250]). https://www.cawater-info.net/bk/improvement-irrigated-agriculture/files/tkp45-304-178-2009.pdf

13. Новиков, А. Е., Ламскова, М. И., Моторин, В. А., & Некрасова, В. В. (2014). Гидравлический расчет лент системы капельного орошения. *Природообустройство*, (2), 29–33.

14. Чугаев, Р. Р. (1982). Гидравлика. Энергоиздат.

15. Шевелев, Ф. А., & Шевелев, А. Ф. (2007). Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справочное пособие (8-е изд., перераб. и доп.). БАСТЕТ.

16. Inner. (n.d.). Формула Дарси–Вейсбаха: потери давления в трубе. https://inner.su/articles/formula-darsi-veysbakha/

17. Keller, J., & Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, *17*(4), 678–684. https://doi.org/10.13031/2013.36936

18. Valiantzas, J. D. (2005). Modified Hazen–Williams and Darcy–Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(4), 342–350. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(342)

19. Wang, J., Chen, R., Yang, T., Wei, T., & Wang, X. (2021). A computationally-efficient finite element method for the hydraulic analysis and design of subsurface drip irrigation subunits. Journal of Hydrology, 595, Article 125990. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125990

20. Wu, I.-P., & Gitlin, H. M. (1974). Drip irrigation design based on uniformity. Transactions of the ASAE, 17(3), 429–432. https://doi.org/10.13031/2013.36875