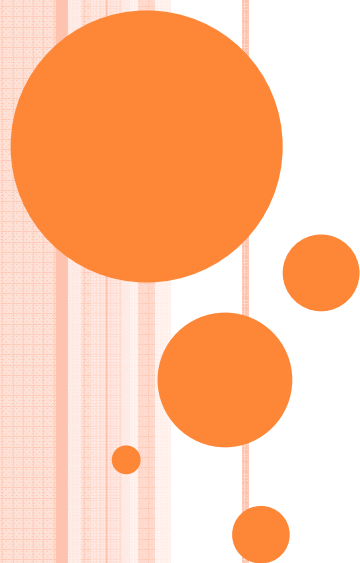


**УЧЕТ СЛОЖНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ
МОДЕЛИРОВАНИИ
ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В
НАПОРНЫХ
ТРУБОПРОВОДНЫХ
СИСТЕМАХ**



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При работе водопроводных систем возникают сложные случаи гидравлического удара, что создает трудности при выборе мероприятий по уменьшению давления в сетях и коммуникациях насосных станций при переходных процессах.

Целью работы является разработка комплексных методов исследования, основанных как на данных экспериментов, так и на результатах расчетов переходных процессов в сложных условиях кольцевых водопроводных сетей .

Достижение поставленной цели потребовало решения ряда проблем, основными из которых являются:

- Совершенствование методики проведения экспериментов по регистрации основных параметров переходных процессов, возникающих при отключении одного или нескольких насосных агрегатов на действующих насосных станциях систем водоснабжения;
- Определение основных факторов, точность задания которых в наибольшей степени влияет на результаты расчета переходных процессов в напорных трубопроводах и разработка количественных методов их сравнения;
- Обоснование расчетной схемы, наиболее адекватно учитывающей особенности переходных процессов в кольцевых сетях систем водоснабжения;
- Проведение численных экспериментов по моделированию переходных процессов в водопроводных сетях при различных возмущающих факторах с учетом неопределенности исходных данных и неоднозначности граничных условий.

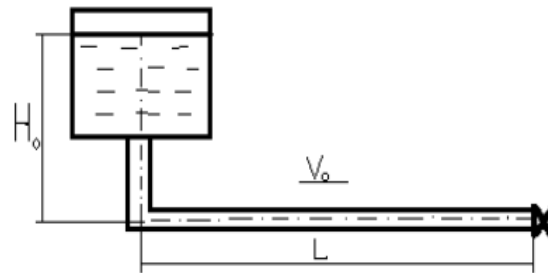
Научная новизна работы. Впервые получены и существенно усовершенствованы следующие положения:

- методика проведения натурных экспериментов на действующих сетях систем водоснабжения;
- проведение расчетов по гидравлическому удару в простом трубопроводе с использованием пакетов компьютерной математики и трехмерным представлением результатов;
- сравнительный анализ основных методов интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих протекание переходных процессов в напорных трубопроводах;
- разработка методики, учитывающей влияние параметров расчетной схемы на максимальное повышение давления при гидравлическом ударе;
- учет кольцевой структуры расчетной схемы путем задания граничных условий в узлах-ветвлениях;
- возможность задания сосредоточенного и распределенного отборов воды из сети;
- проведение расчетов, описывающих протекание переходных процессов в кольцевых водопроводных сетях для различных расчетных случаев в широком диапазоне вариации параметров;

Переходный процесс в гидравлической системе – это переход из одного условного стационарного режима в другой с изменением параметров (давление, скорость движения воды, частота вращения ротора агрегата и др.), определяющих эти процессы за их пределы при стационарных режимах.

Повышения давления в напорных системах водоподдачи происходят при переходных процессах, возникающих при нештатных остановках насосных агрегатов, а также их пусках, изменении частоты вращения насосных агрегатов, закрытиях запорной арматуры, заполнениях трубопроводов водой

Влияние метода интегрирования уравнений переходного процесса на точность расчетов



Рассмотрим решение задачи в системе MathCad.

Потери на трение и местные сопротивления учитывать не будем. В этом случае уравнения неустановившегося движения воды в трубопроводе (без конвективных членов) будут иметь вид (h – напор, v – скорость, c – скорость волн):

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

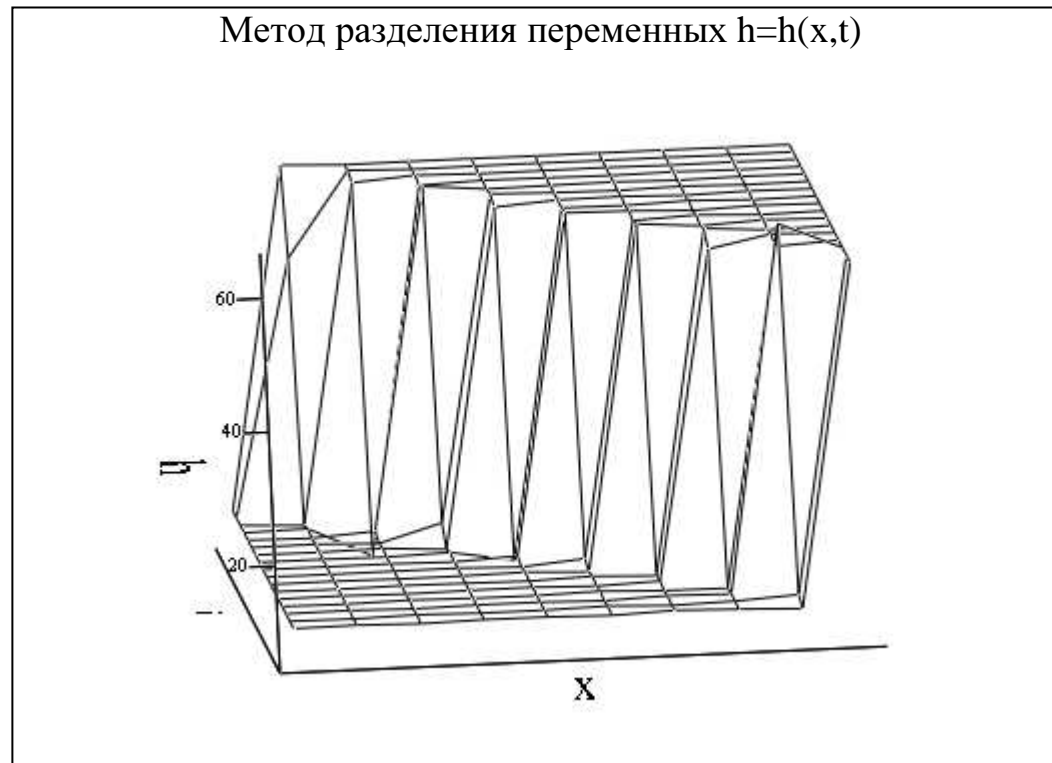
уравнение количества движения

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \frac{v|v|}{2gd} = 0$$

Общее решение для функции $h(x,t)$ полученное методом разделения переменных, имеет вид:

$$h(x,t) = H_0 + \frac{c v_0}{g L} \cdot x + \frac{2c v_0}{g \pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{n} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi c}{L} t\right)$$

где H_0 – высота бака; c - скорость распространения волны; g - ускорение свободного падения; L - длина трубопровода; v_0 - начальная скорость.

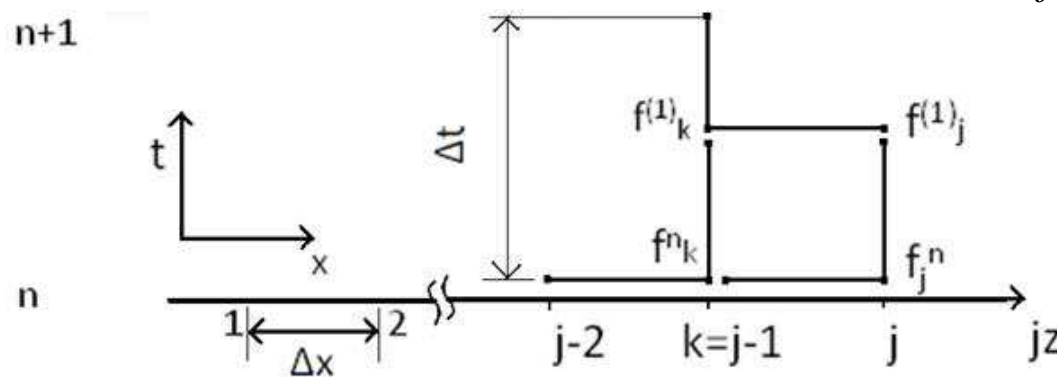


h

Решение методом Маккормака.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial A(f, x, t)}{\partial x} + B(f, x, t) = 0 \quad \text{где } f, A \text{ и } B - N\text{-мерные векторы}$$

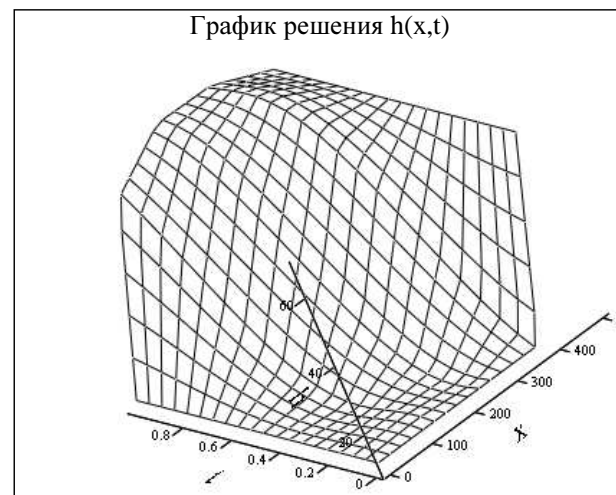
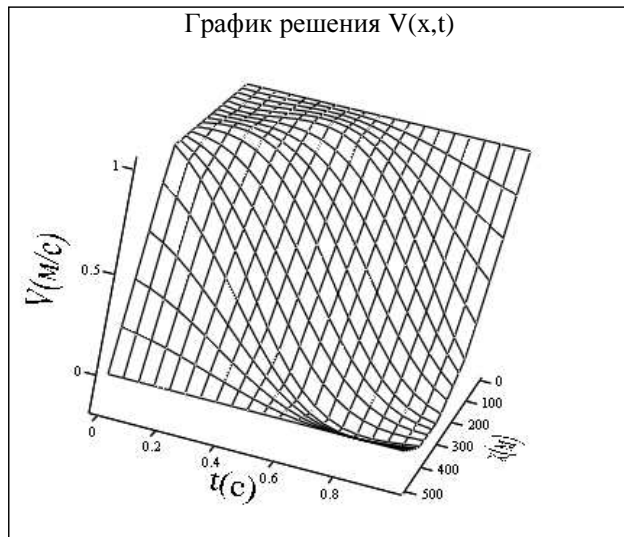
$$f = \begin{pmatrix} h \\ v \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} c^2 v \\ g \\ gh \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda \frac{|v|v}{2d} \end{pmatrix}$$



$$f_j^{(1)} = f_j^n - \Delta t \left[\frac{1}{\Delta x} (A_j^n - A_k^n) + B_j^n \right]$$

$$f_k^{n+1} = 0,5 \left\{ f_k^n + f_k^{(1)} - \Delta t \left[\frac{A_j^{(1)} - A_k^{(1)}}{\Delta x} + B_k^{(1)} \right] \right\}$$

Решение задачи с использованием стандартных процедур MathCad

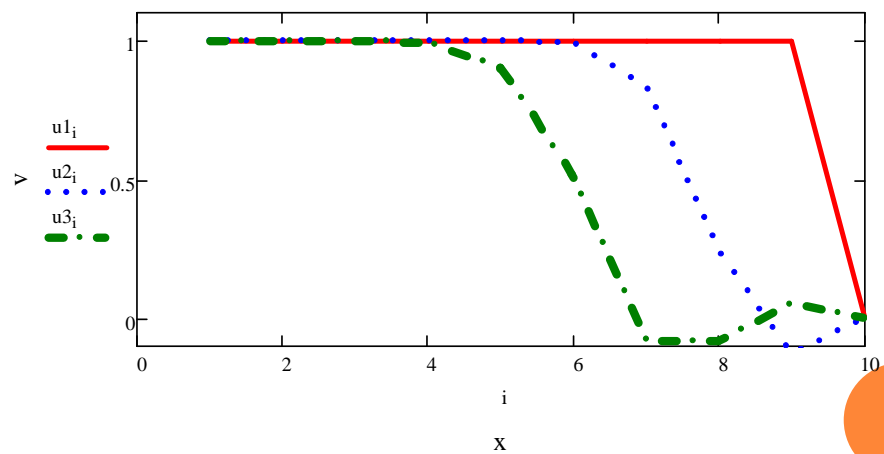
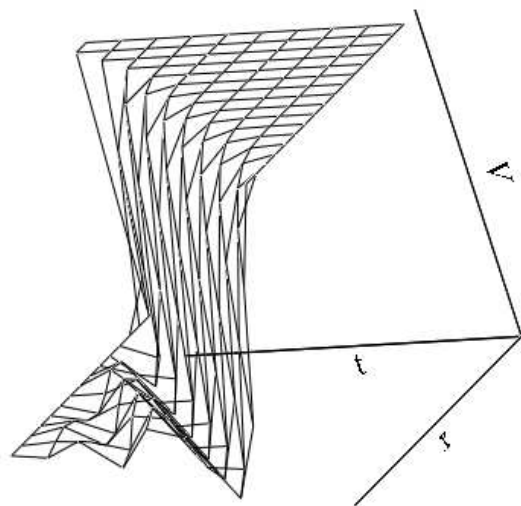


N1

M

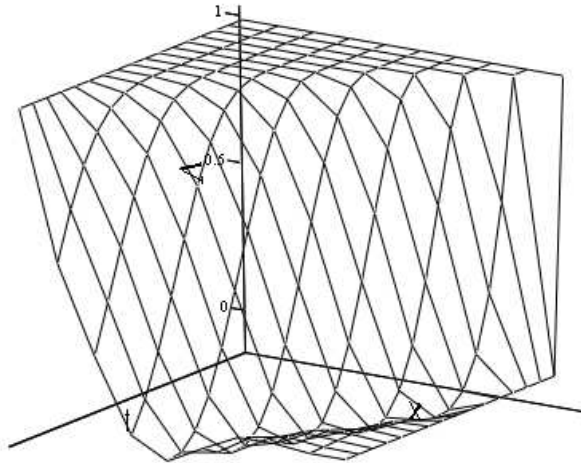
Решение задачи методом конечных разностей.

График численного решения $V(x,t)$

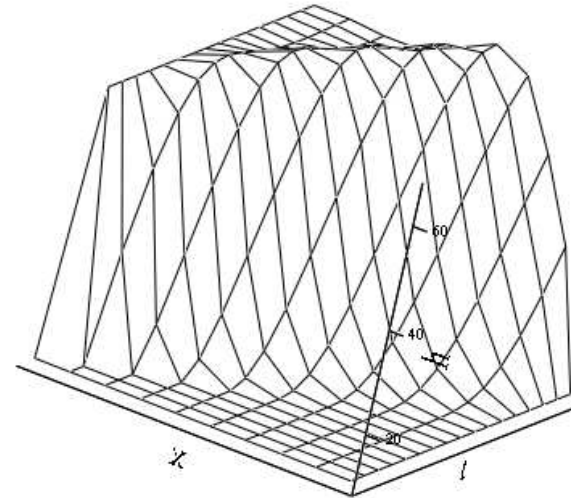


Численные методы сквозного счёта

Метод Маккормака $v=v(x,t)$

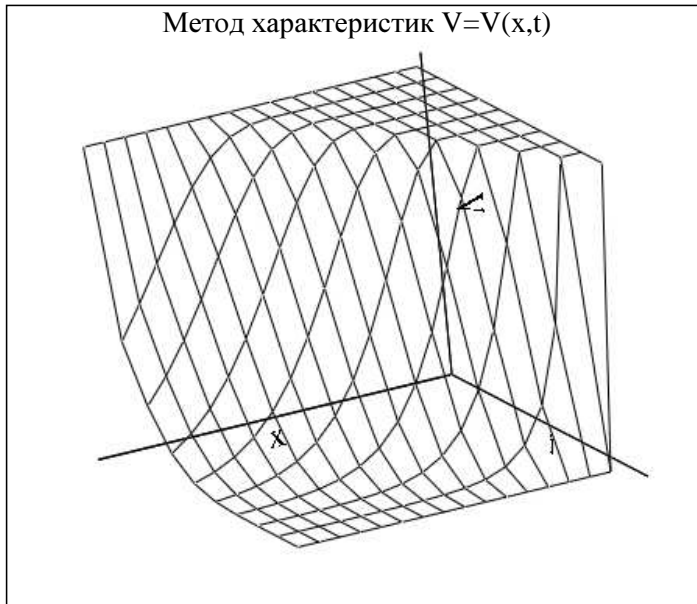


Метод Маккормака $h=h(x,t)$

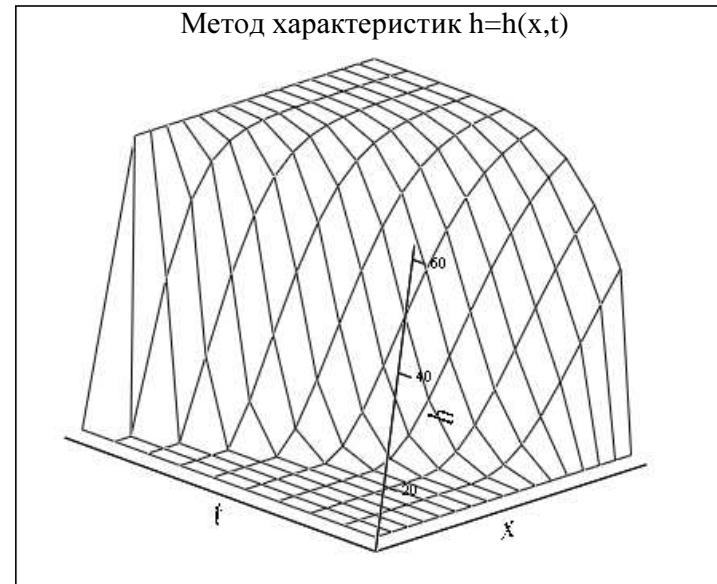


Метод характеристик

Метод характеристик $V=V(x,t)$

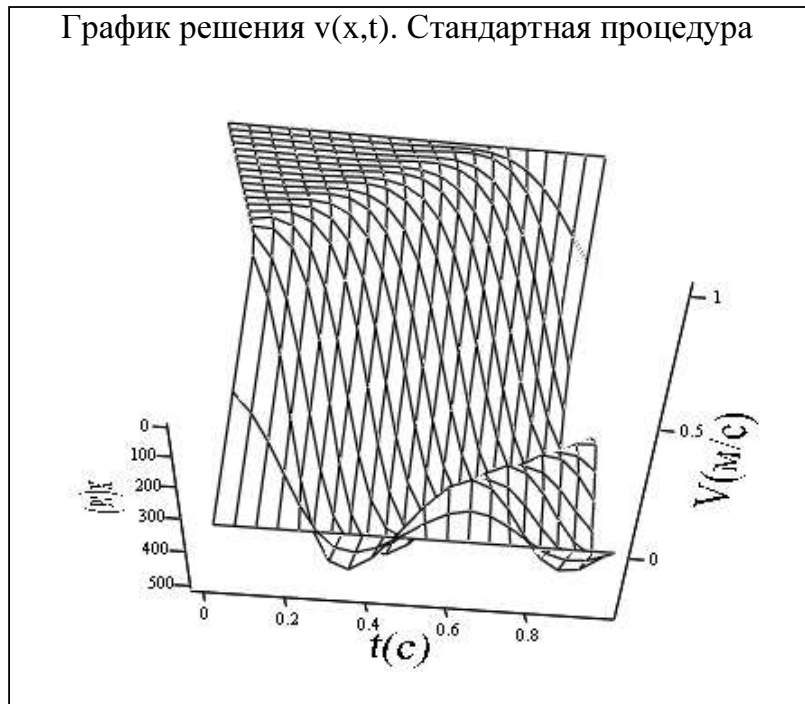


Метод характеристик $h=h(x,t)$



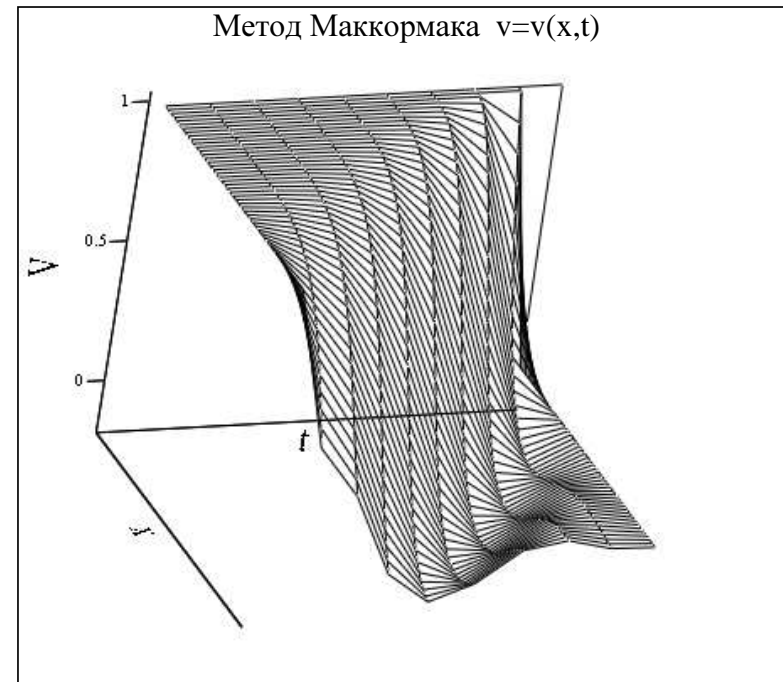
Сравнение метода Маккормака и стандартной процедуры

График решения $v(x,t)$. Стандартная процедура



М

Метод Маккормака $v=v(x,t)$



В

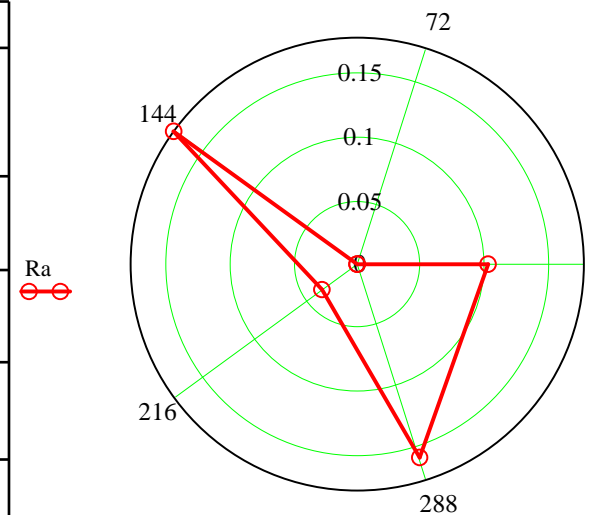
Сравнение методов интегрирования уравнений гидроудара

МЕТОД						
	Разделения переменных (р.п.) $k=150$; $\lambda=0$	Конечных разностей $\lambda=0$	Маккор-мака $\lambda=0$	Характеристик $\lambda=0$	Маккор-мака $\lambda \neq 0$	Характеристик $\lambda \neq 0$
t/t_{pn}	1	0,323	0,971	0,845	1,106	1,067
$\Delta h_{max}(M)$	4,58	-	7,76	0	5,15	0
$\Delta h_{min}(M)$	4,49	-	0	0	4,47	4,58
$\Delta v_{max} M/c$	-	0	0	0	0	0
$\Delta v_{min} M/c$	-	0,216	0,152	0	0,123	0,028

Формула абсолютной релевантности

$$R_{Yl}^a = \frac{j}{Z(Y, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_l, \dots, \bar{x}_L)} - \frac{j}{Z(Y, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_l, \dots, \bar{x}_L)}$$

Лепестковая диаграмма релевантностей



		r1	
		0	1
0	0	"Метод"	
1	72	"Lambda"	
2	144	"с"	
3	216	"Ho"	
4	288	"vo"	

Особенности расчета переходных процессов в системе водоснабжения

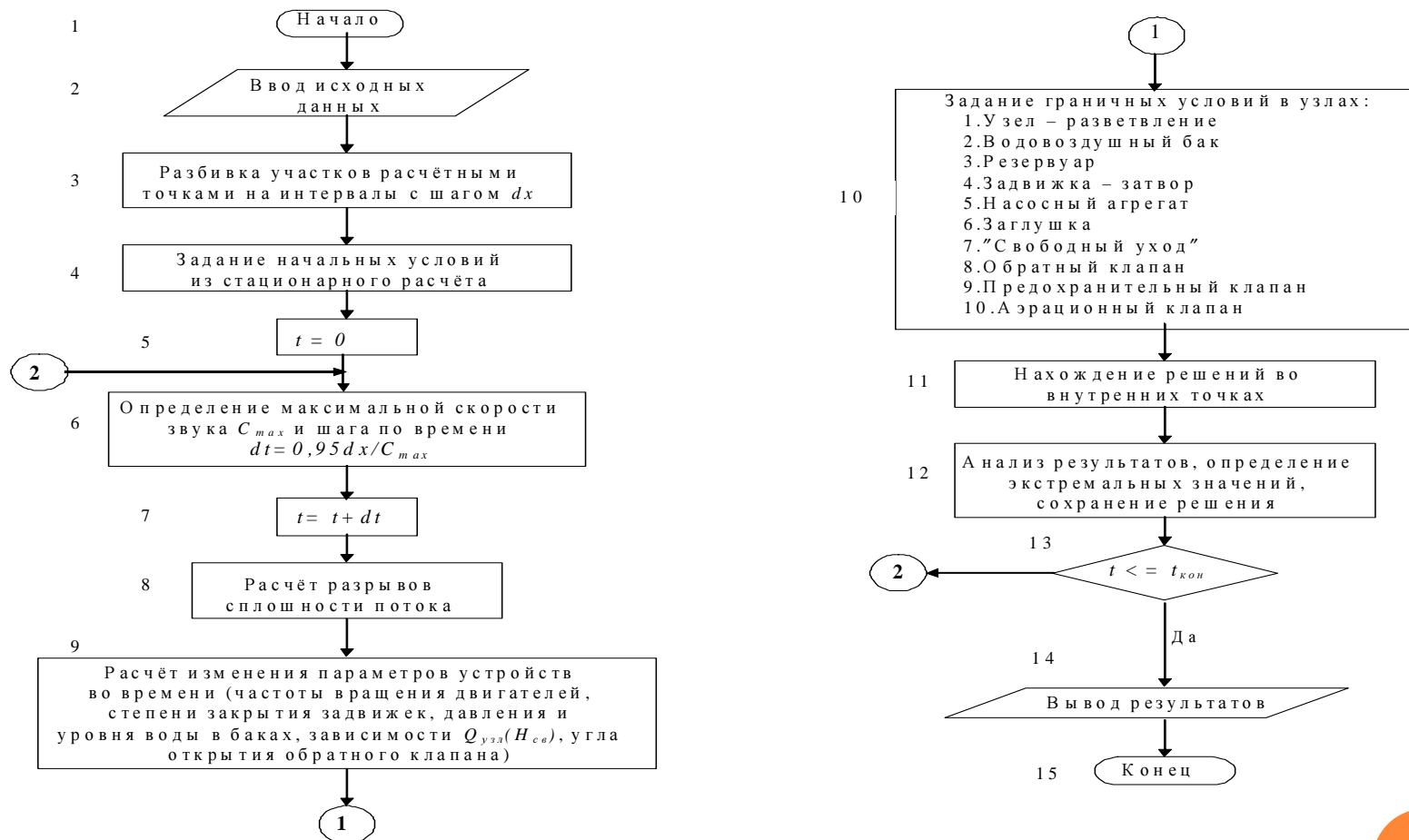
- Обоснована расчетная схема, наиболее адекватно учитывающая особенности переходных процессов в кольцевых сетях систем водоснабжения;
- Учет кольцевой структуры расчетной схемы рекомендуется производить путем задания граничных условий в узлах-ветвлениях;
- Обоснована возможность задания сосредоточенного и распределенного отборов воды из сети;
- Проведено теоретическое обоснование проведения расчетов, описывающих протекание переходных процессов в кольцевых водопроводных сетях для различных расчетных случаев в широком диапазоне вариации параметров.

Моделирование переходных процессов в СПРВ

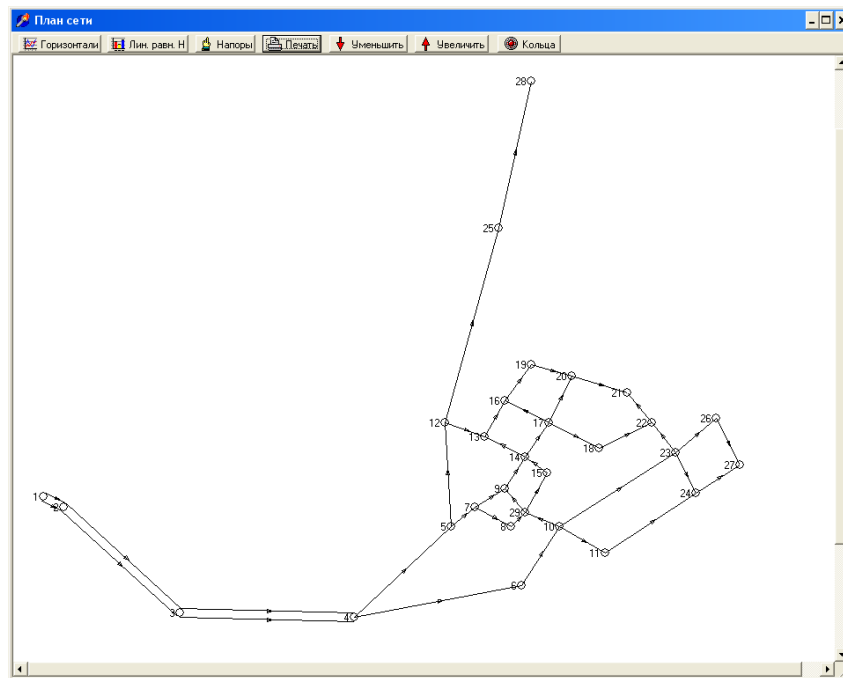
Переходные процессы возникают в трубопроводах вследствие:

- Аварийных отключений и провалов энергоснабжения;
- Сбоев систем автоматики и управления;
- Срабатывания запорной трубопроводной арматуры;
- Быстрых коммутационных переключений;
- Ошибок обслуживающего персонала;
- Аварийных разрывов трубопроводов;
- выхода из строя арматуры и насосных агрегатов.

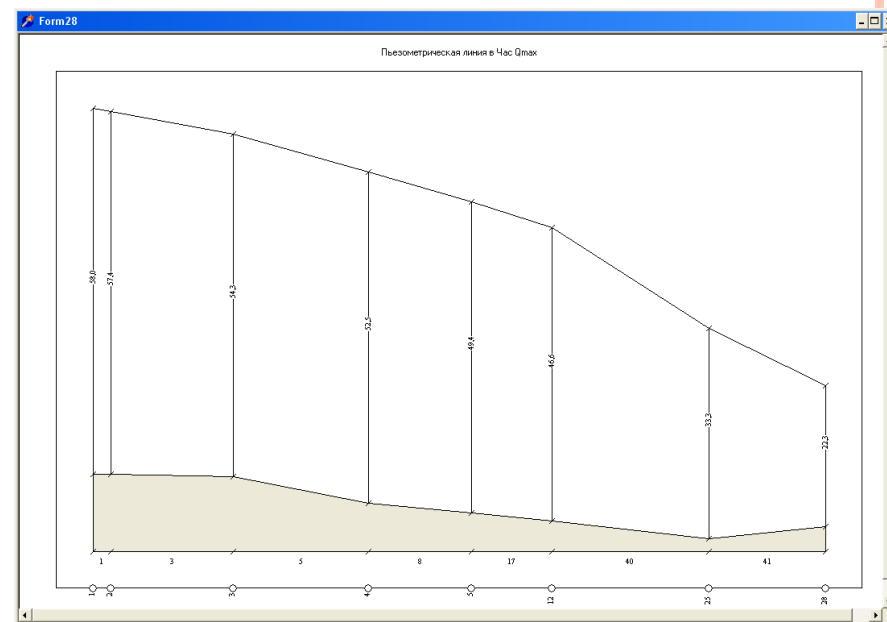
Блок-схема расчёта переходных процессов методом установления



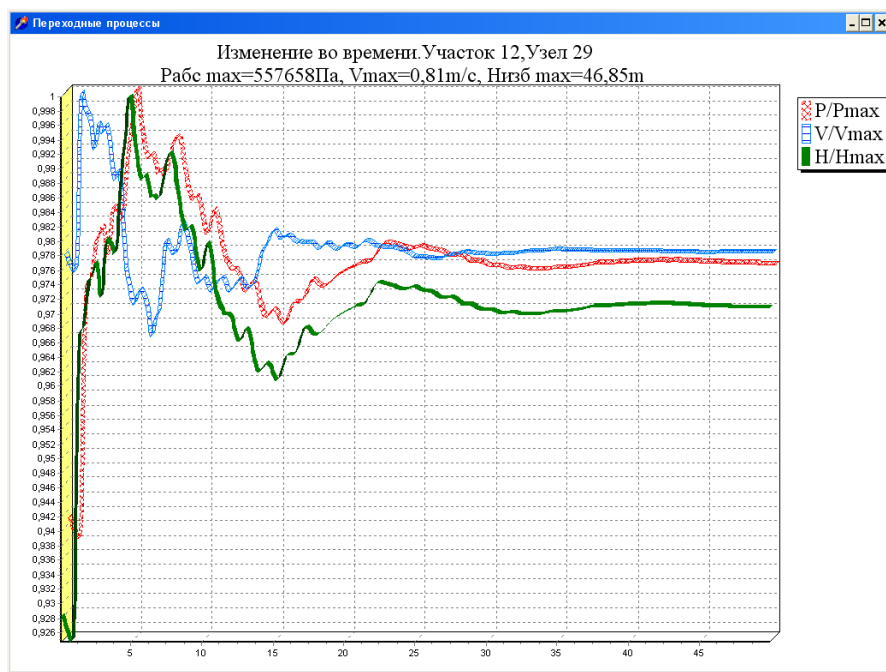
План сети.



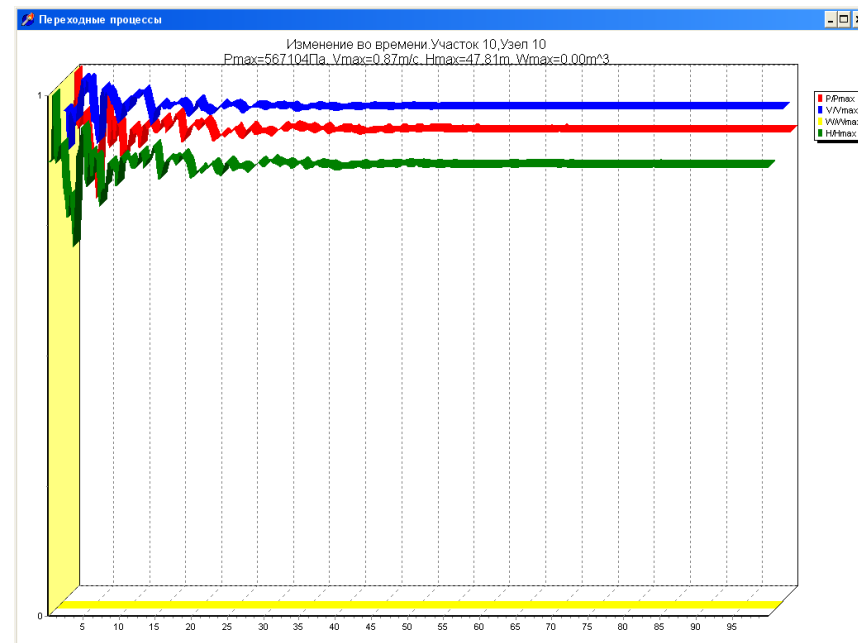
Пьезометрическая линия в час наибольшего водопотребления



Процесс установления (расходы узловые)

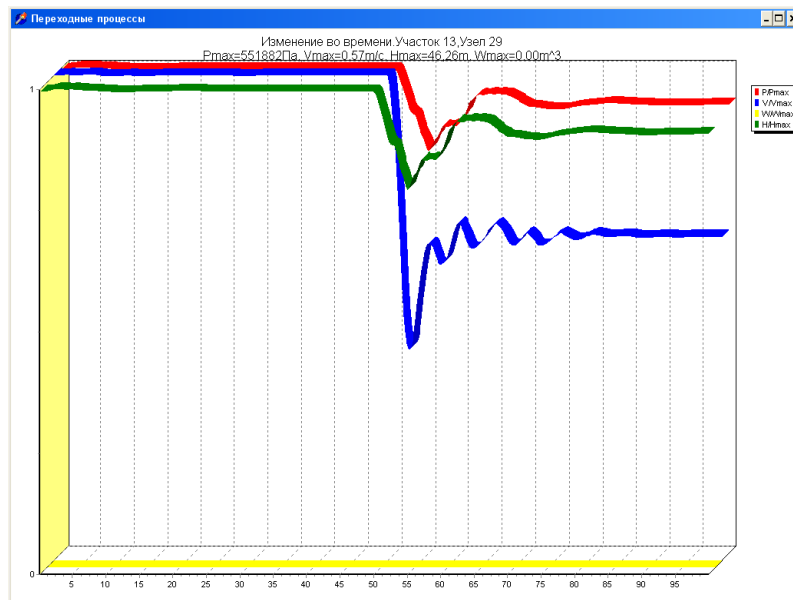


Процесс установления (переход к распределенным расходам)

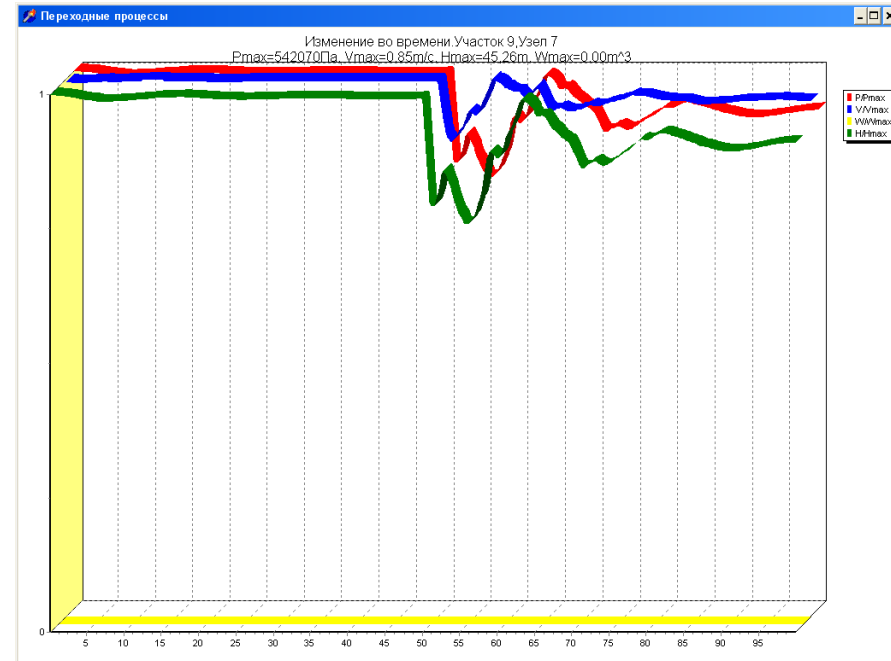


Моделирование переходных процессов, возникающих при авариях на трубопроводах

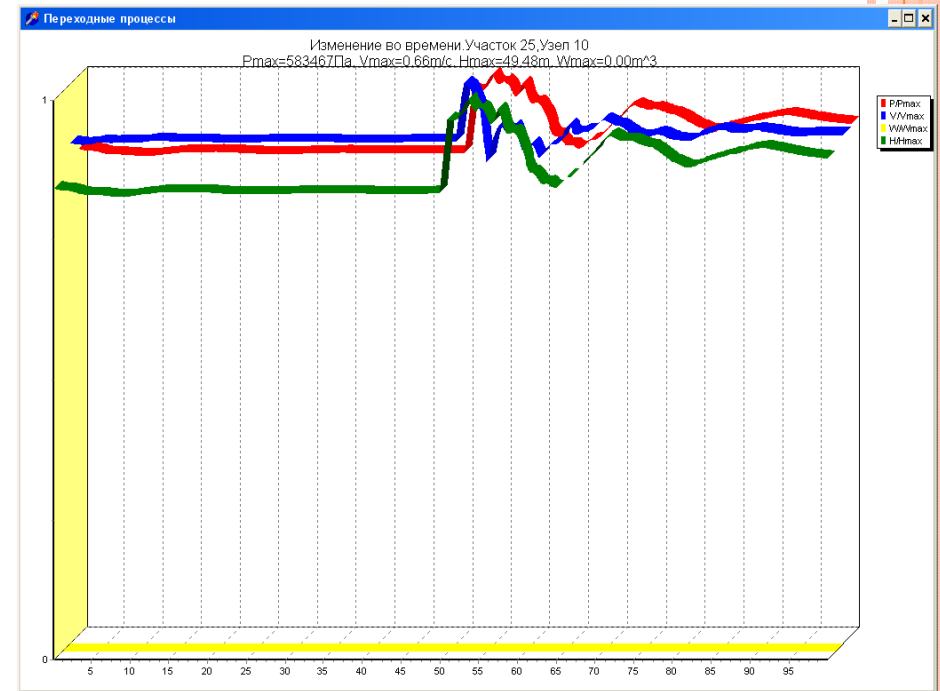
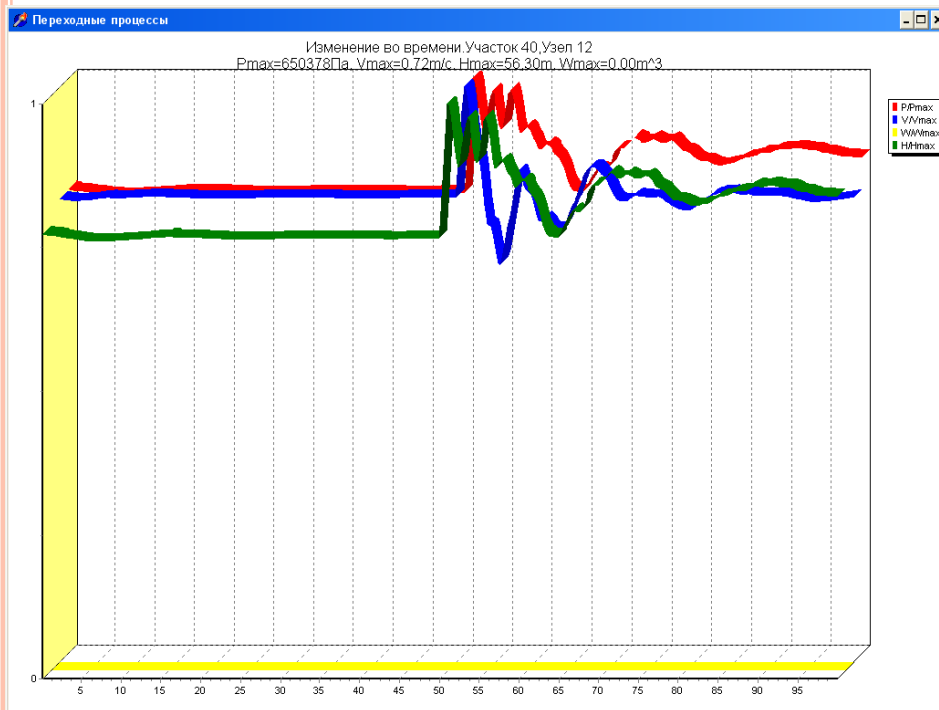
Моделирование разрыва участка 3-4



Моделирование разрыва участка 4-5

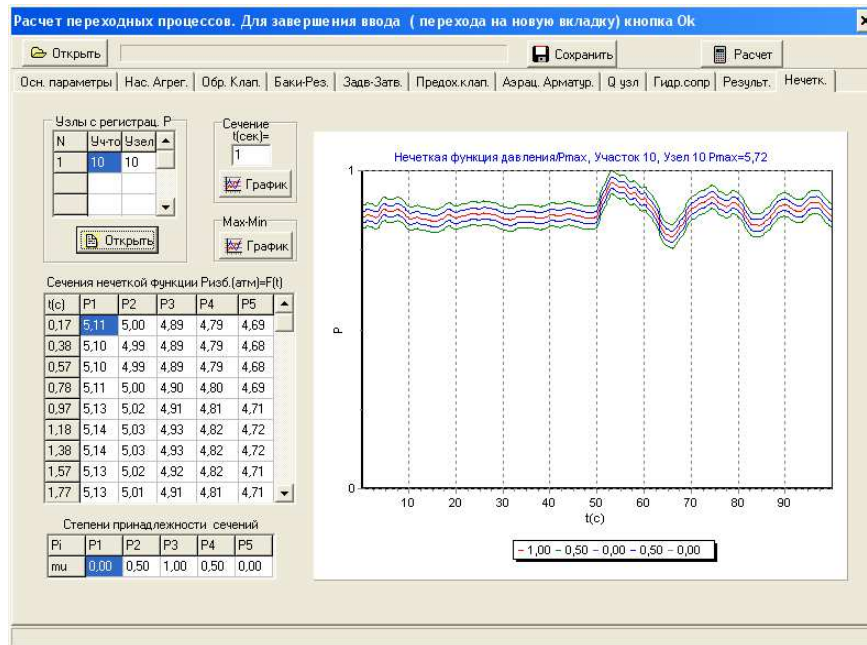


Аварийное отключение расхода узла 12 Аварийное отключение расхода узла 10

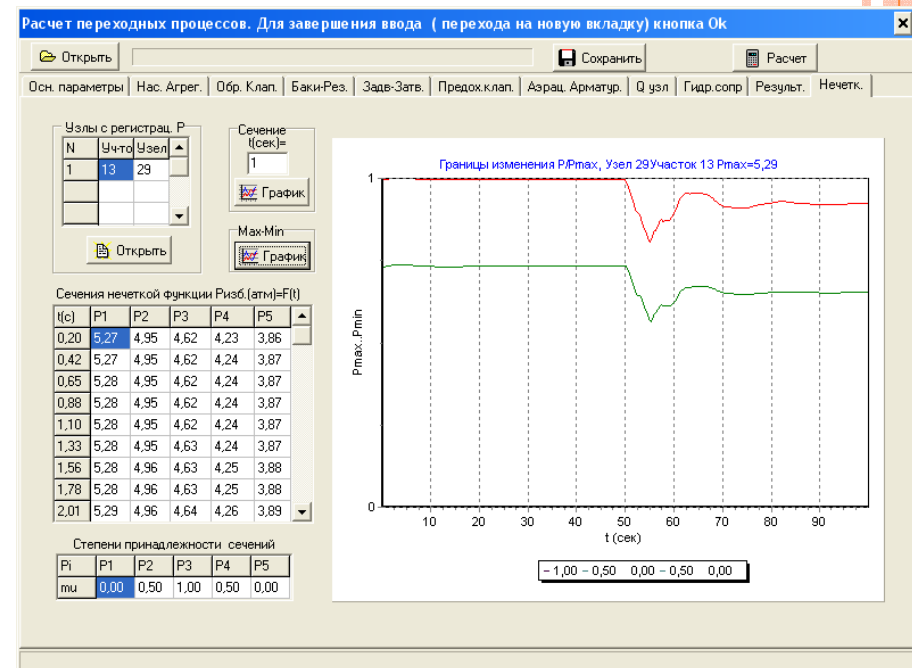


Учет вариаций параметров в расчетах переходных процессов СПРВ

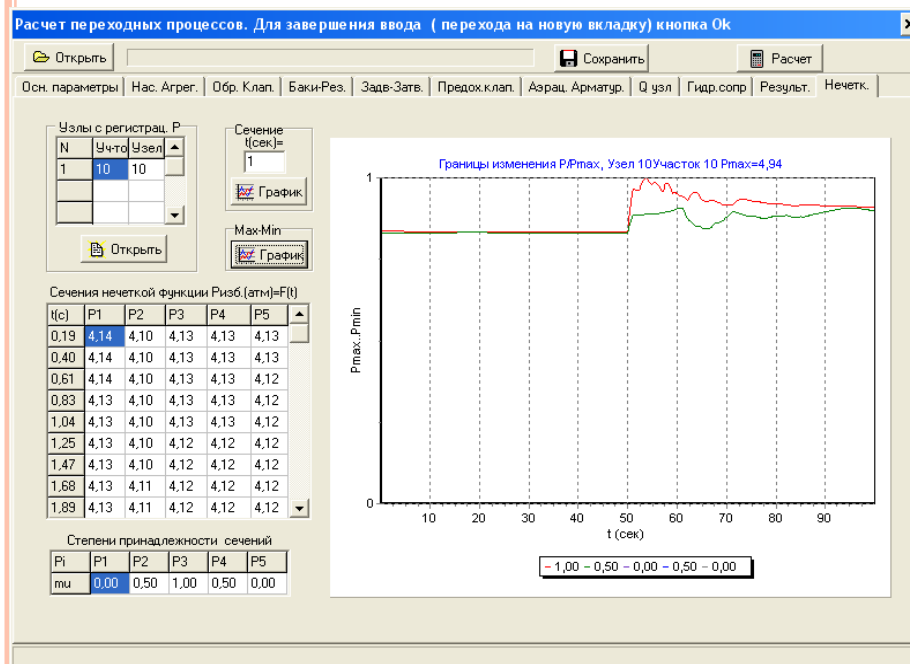
Семейство напоров от времени при отключении отбора в узле 10 при вариации гидравлических сопротивлений



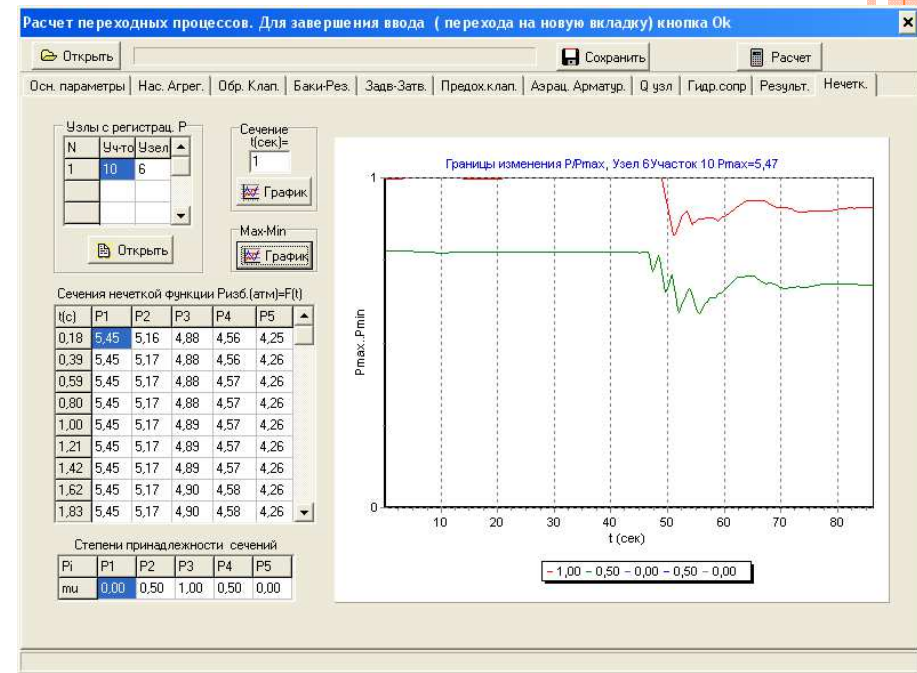
Граничные кривые напоров при разрыве участка 7 и вариации $Q_{уэл}$



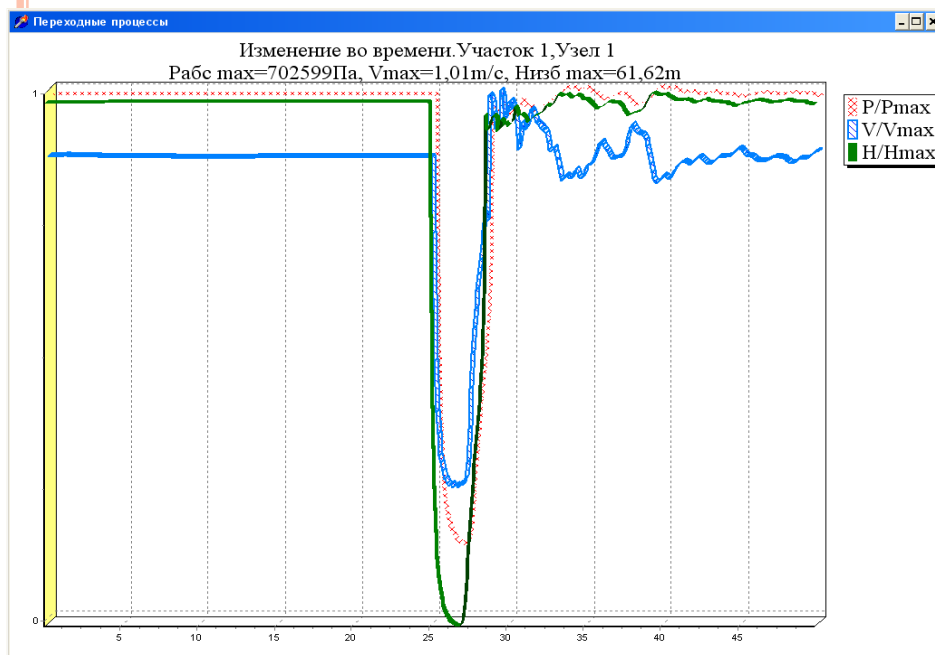
Отключение отбора в узле 10 при скоростях волн 330-870м/с



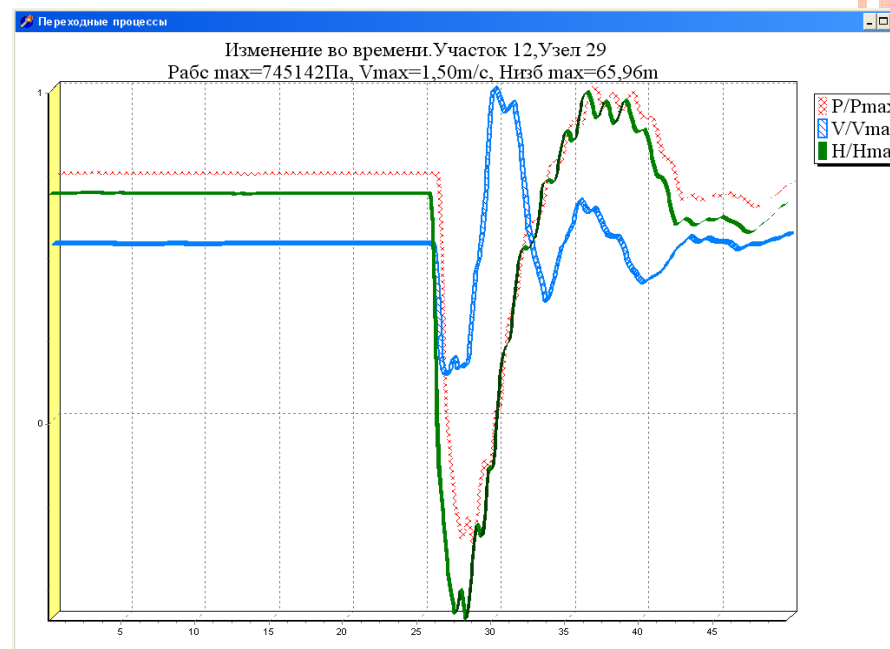
Разрыв участка 7 при одновременном изменении параметров (скоростей звука, узловых расходов и гидравлических сопротивлений)



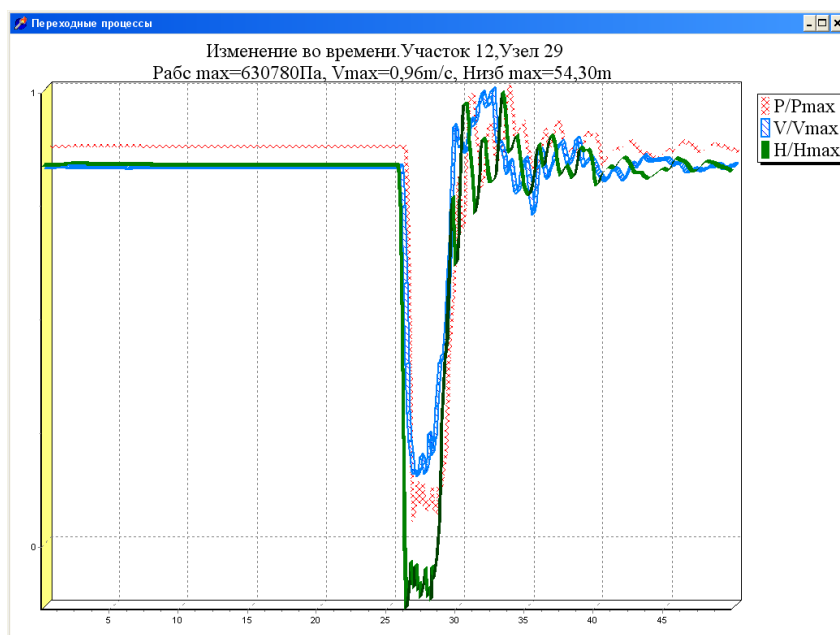
Отключение насоса на 2 сек, параметры у насосной станции



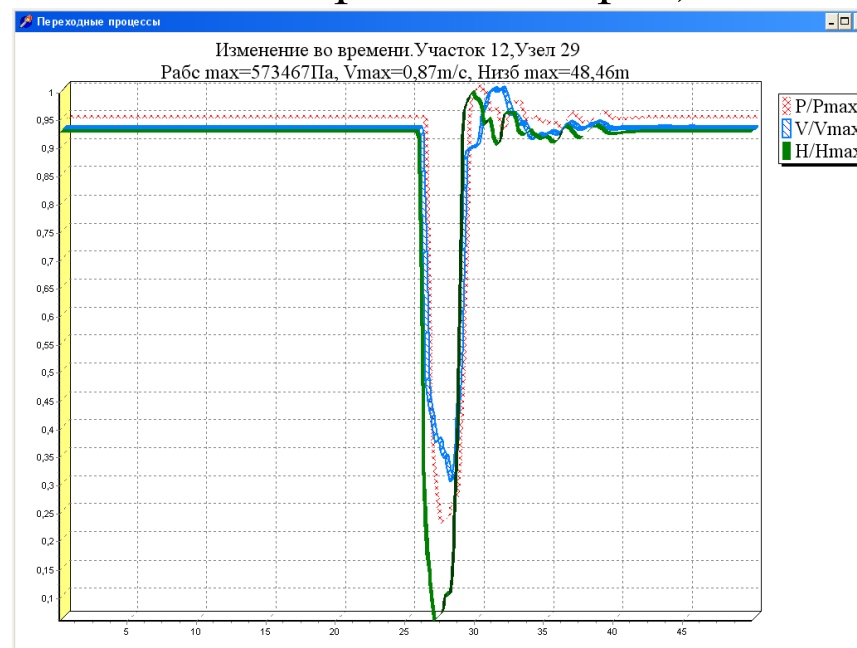
Отключение насоса на 2 сек, параметры в центре сети (без выделения разрывов сплошности)



Отключение насоса на 2 сек, параметры в центре сети (с выделением разрывов сплошности)



Отключение насоса на 2 сек, параметры в центре сети (с выделением разрывов сплошности и с учетом зависимости отборов от напоров)



Экспериментальные исследования переходных процессов в напорных системах водоподачи с насосными станциями

Проведению исследований переходных процессов предшествовало обследование насосных станций II и III подъемов и трубопроводов водопроводной сети г. Кингисепп Ленинградской области.

Целью обследования было: выявить причины аварий на водопроводной системе, неудовлетворительной работы трубопроводной арматуры, а также выбрать объекты для проведения натурных исследований. Проведение экспериментов в натуральных условиях в полном объеме практически невозможно. Это связано с экономическими и организационными трудностями, так и с невозможностью учета влияния ряда факторов на протекание переходных процессов в водопроводных системах, а также с невозможностью изменения отдельных параметров в широких пределах при проведении натурных экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования проводились для следующих случаев:

В первом случае имитировалось аварийное отключение насосного агрегата. Во втором случае имитировалось аварийное отключение насосной станции. Воспроизводилось условие протекания переходных процессов при аварийном отключении электроэнергии. В третьем случае имитировалась аварийная остановка насосного агрегата.

Порядок проведения исследований:

- Включение аппаратуры, проверка исправности;
- установка нулевых значений на шкале приборов;
- проверка прохождения импульсов;
- устанавливался выбранный режим работы системы;
- фиксировались начальные показания;
- производились отключения насосных агрегатов;
- запись продолжалась в течение 45...300 секунд;
- производилась предварительная оценка полученных записей, на основании которых принималось решение о повторении режима или о переходе к следующему режиму.

Обработка сводилась к определению следующих величин:

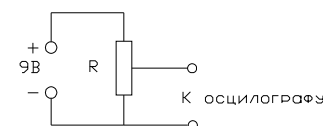
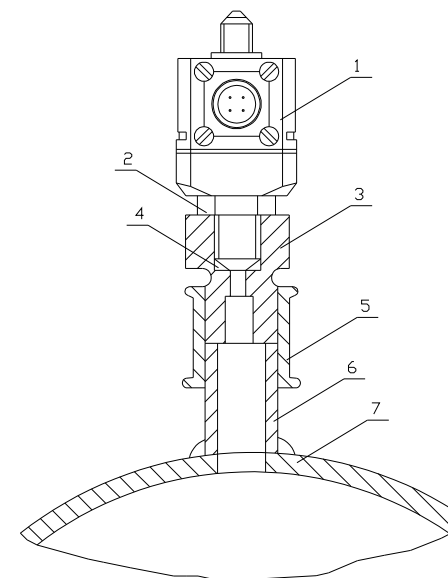
- значений давлений в различных точках системы;
- времени добегания волн гидроудара от одного датчика до другого;

Измерение давления.

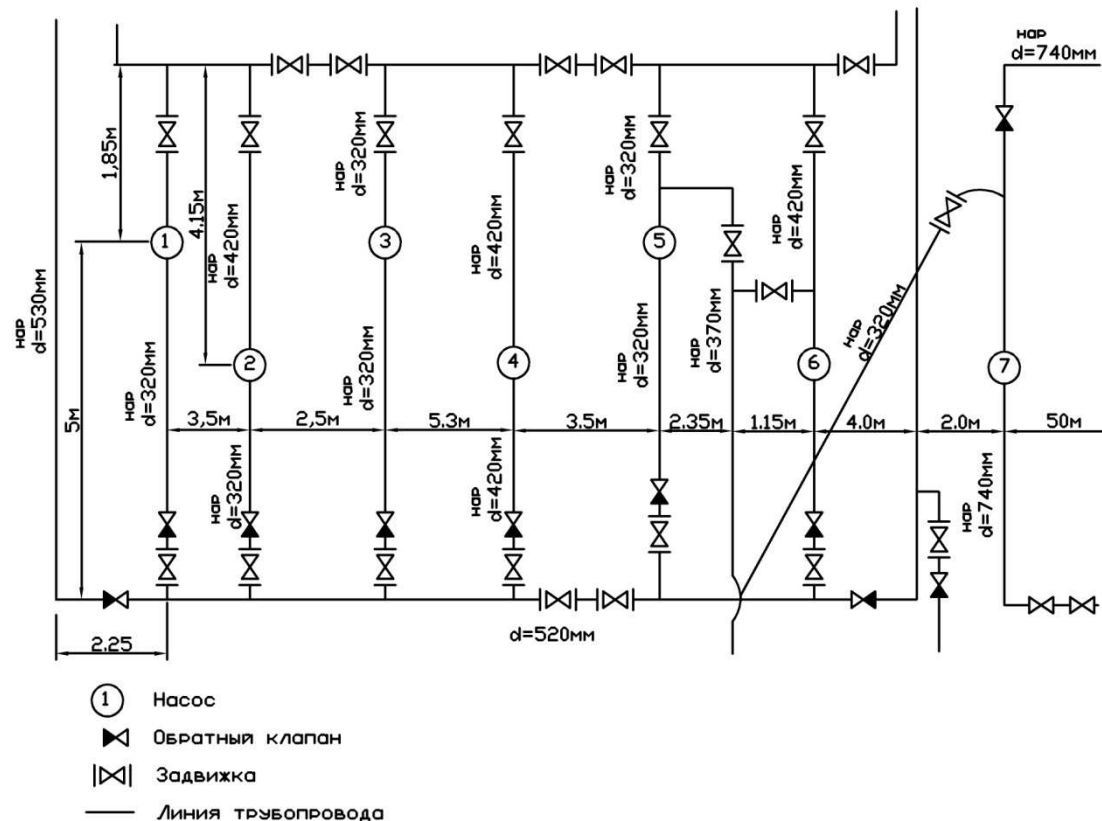
При проведении натуральных исследований переходных режимов для измерения давления использовались датчики давления потенциометрического типа (МДД, ТМД), допускающие работу с длительными соединительными линиями.

Тарировка датчиков выполнялась на прессе статическим методом «на нагнетание» и «на сброс» с использованием образцовых манометров типа МД 160.

При стационарных режимах давление измерялось также по образцовым манометрам типа МО 160 класса точности 0,4.



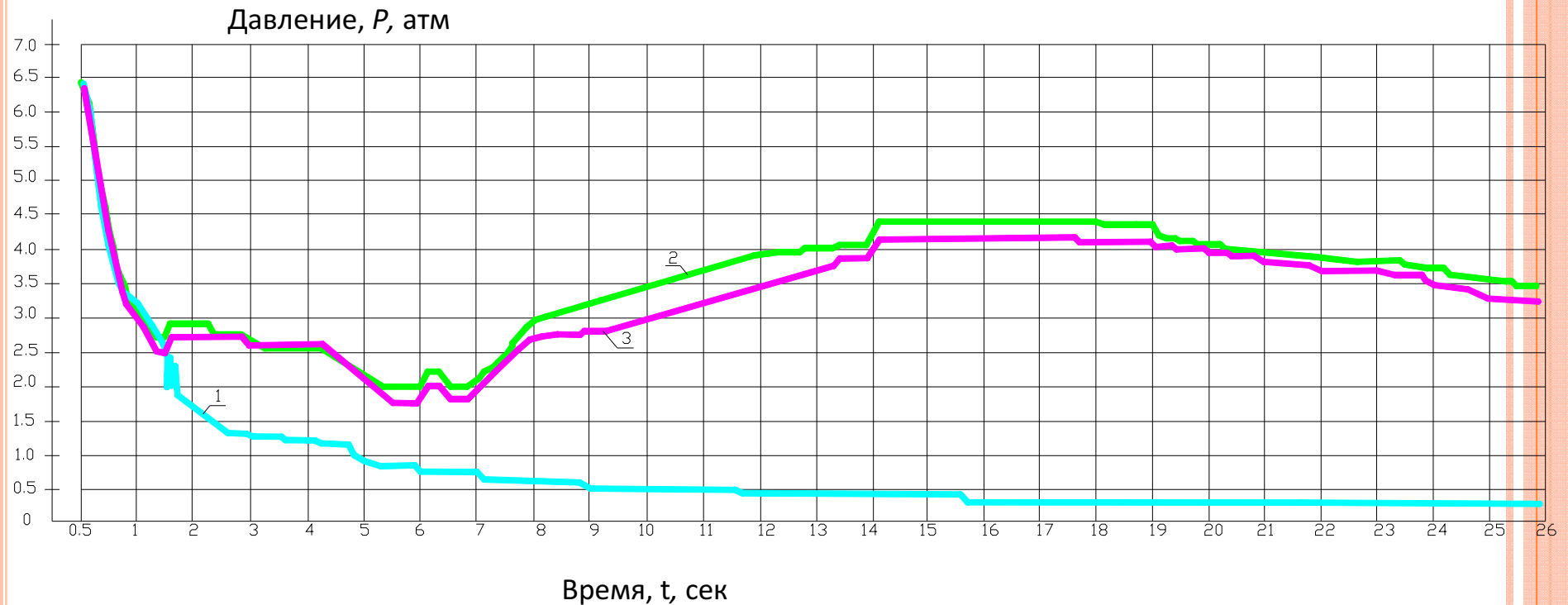
Экспериментальные исследования на насосной станции II подъема



Эксперименты проводились для следующих случаев: отключение одного из двух параллельно работающих насосных агрегатов, одновременное отключение двух параллельно работающих насосных агрегатов, а также отключение одного работающего насоса.

В первом случае при работе двух насосных агрегатов №2 и №3 расход воды насосной станции составлял 1420 м³/ч. Во втором случае при работе тех же насосных агрегатов расход равнялся 1275 м³/ч. В третьем случае при подаче воды одним насосным агрегатом № 3 расход станции был равен 1060 м³/ч.

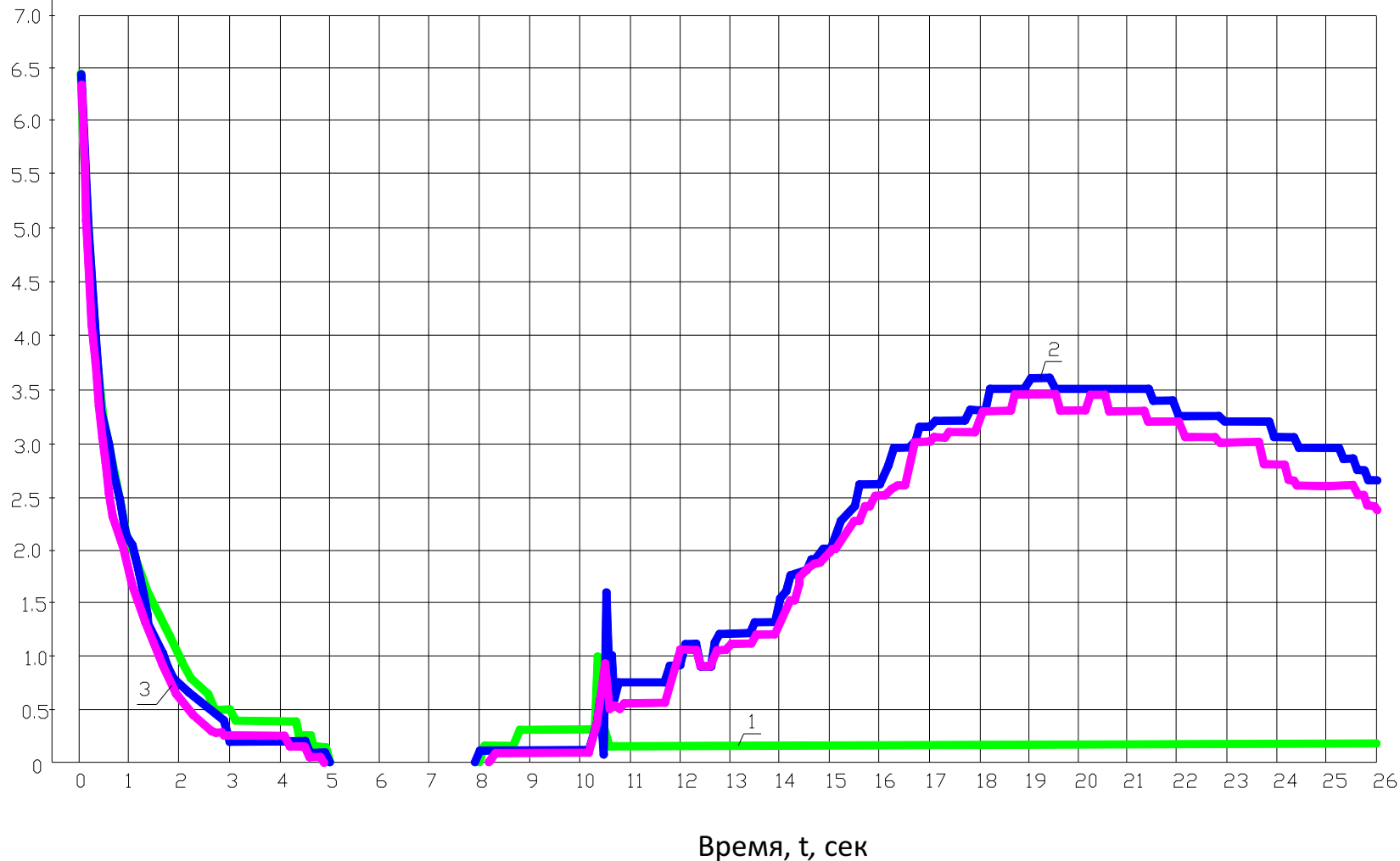
Отключение насосного агрегата №3 при работе насосных агрегатов №2 и №3



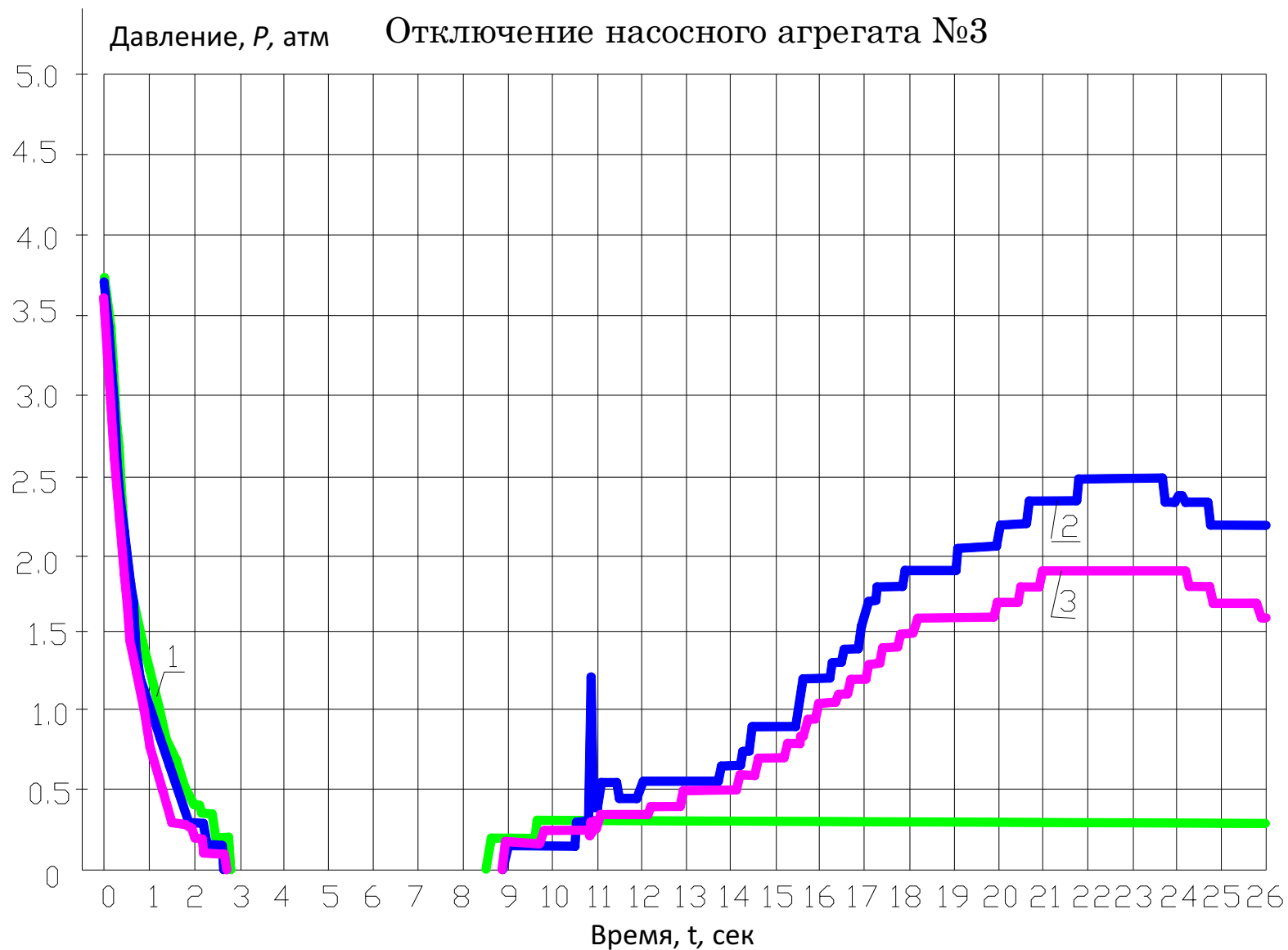
На напорной линии насоса №3 перед обратным клапаном – датчик давления №1, на напорной линии насоса №3 после обратного клапана – датчик давления №2, на левом напорном водоводе – датчик давления №3.

Давление, P , атм

Отключение насосных агрегатов №2 и №3



На напорной линии насоса №3 перед обратным клапаном – датчик давления №1, на напорной линии насоса №3 после обратного клапана – датчик давления №2, на левом напорном водоводе – датчик давления №3.



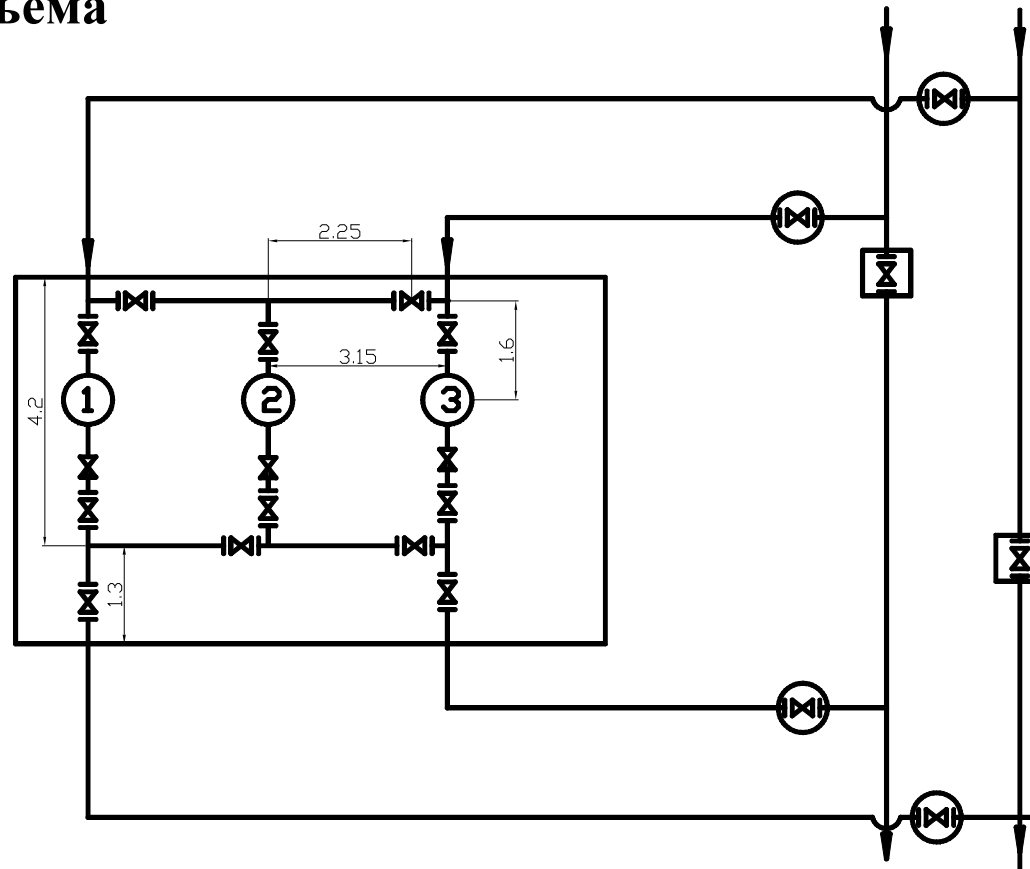
На напорной линии насоса №3 перед обратным клапаном – датчик давления №1, на напорной линии насоса №3 после обратного клапана – датчик давления №2, на левом напорном водоводе – датчик давления №3.

Водопроводная сеть. Остановка насосных агрегатов №2 и №3



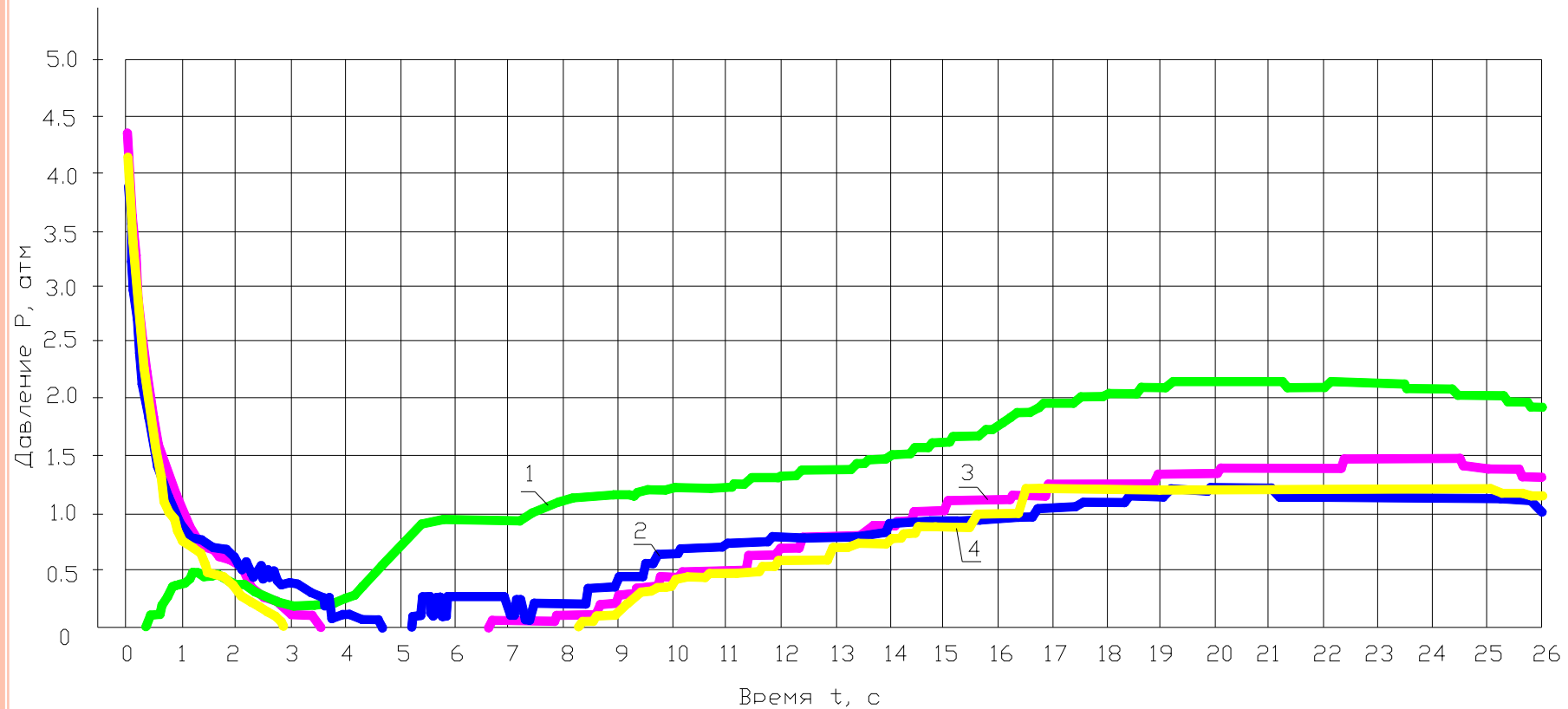
Датчик на сети водоснабжения – датчик давления №1, датчик на сети водоснабжения – датчик давления №2 на расстоянии 145 м от датчика №1.

Экспериментальные исследования на насосной станции III подъема



При проведении экспериментов давления измерялось в четырех точках: на всасывающей линии насоса №2 - датчиков давления №1, на напорной линии насоса №2 перед обратным клапаном - датчик давления №2, на напорной линии насоса №2 после обратного клапана - датчик давления №3, в напорном трубопроводе - датчик давления №4.

Насосная станция III подъема. Остановка насосного агрегата №2



На всасывающей линии насоса №2 - датчиков давления №1, на напорной линии насоса №2 перед обратным клапаном - датчик давления №2, на напорной линии насоса №2 после обратного клапана - датчик давления №3, в напорном трубопроводе - датчик давления №4.

БЛАГОДАРЮ ЗА
ВНИМАНИЕ!