

## Гидротехническое строительство

УДК 502/504 : 626. 83

**С. Н. КАРАМБИРОВ, Д. С. БЕГЛЯРОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

**Д. М. ЛИХАНОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

### **О ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ПРОСТОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

*Моделируются различные варианты расчета переходных процессов. Каждому варианту (расчетному случаю) могут соответствовать различные результаты решений. В статье рассматривается влияние гидравлического сопротивления, скорости ударной волны, отбора воды, величины начального напора и метода расчета на максимальное повышение напора при гидравлическом ударе.*

*Переходные процессы, гидравлическое сопротивление, отбор воды, гидравлический удар, ударная волна.*

*Different estimation variants of transitional processes are modeled. Different results of solutions can correspond to each variant (estimation case). The article considers the influence of the hydraulic resistance, velocity of impact wave, water takeoff, initial head value and method of estimation on the maximum head increase under the hydraulic impact.*

*Transitional processes, hydraulic resistance, water takeoff, hydraulic impact, impact wave.*

В простейшем случае в процессе расчета переходных процессов определяются параметры, выход которых за допустимые пределы может привести к нарушению работоспособности системы. При этом исследователь рассматривает (моделирует) различные варианты расчета.

Предположим, что каждым вариантом расчета однозначно определяется некоторый результат, имеющий количественную оценку в виде вектора критических параметров решения (например, максимального и минимального давления для каждого участка за период моделирования, величины

объема разрыва сплошности потока и т.д.). В более сложных случаях каждому варианту расчета (расчетному случаю) вследствие независимых от человека внешних условий (состояний) могут соответствовать различные результаты решений.

При расчетах переходных процессов в системах подачи и распределения воды (СПРВ) состояниями могут быть коэффициенты гидравлических сопротивлений (местные и по длине), скорости звука в участках, величины и характер отборов воды из сети и т.д.

Каждой реальной ситуации соответствует некоторая комбинация возможных реализаций внешних факторов. При недостаточной информации входные параметры могут быть выражены недетерминированным способом. Таковы, например, способы задания параметра с помощью какого-то числа его дискретных значений или кусочно-постоянных величин. Проблемы принятия решений с недетерминированно заданными параметрами называют проблемами в условиях недостатка информации [1].

Результаты расчета переходных процессов в СПРВ являются основой для принятия тех или иных технических решений.

Различие между ожидаемым и действительным результатами оказывается в целом тем меньшим, чем более информации об имеющейся ситуации. Поэтому принимающий решение должен стремиться обосновывать свой выбор на максимально возможном уровне информации. Однако, если он считает свой уровень информации более высоким, чем тот, который имеется на самом деле, это приводит к ошибкам [1].

Рассмотрим традиционную задачу мгновенного закрытия запорного устройства в конце трубопровода, питаемого из резервуара (рис. 1).

Одной из целей задачи является определение функций скорости и напора во времени и в пространстве  $v = v(x, t)$ ;  $h = h(x, t)$  аналитически (методом разделения переменных) [2] и численными методами: аппроксимации частных производных (конечных раз-

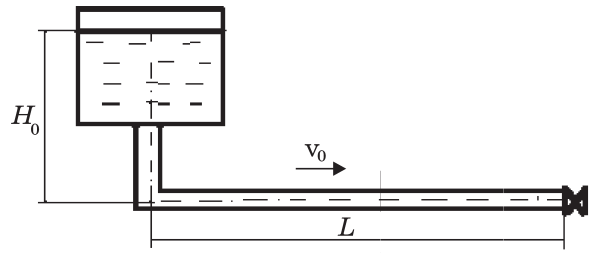


Рис. 1. Расчетная схема примера

ностей) [3]; сквозного счета Маккормака [4]; методом характеристик [5]; стандартным методом системы компьютерной математики MathCad [3].

Координата  $x$  откладывается вдоль трубопровода длиной  $L = 500$  м (см. рис. 1),  $v_0 = 1$  м/с и  $H_0 = 10$  м – начальные скорость и напор в начале координат в нулевой момент времени соответственно.

Полученные результаты необходимо сравнить для определения степени влияния на решение не только числовых параметров, но и метода, которым решалась задача.

В практических ситуациях всегда имеется значительное число параметров, более или менее неизвестных и требующих своей оценки. Если имеется  $L$  неизвестных параметров с  $n_l$  возможными состояниями для  $l$ -го из них, то всего получается  $N$  состояний:

$$N = \prod_{l=1}^L n_l. \quad (1)$$

Таким образом, сложно работать с неопределенными параметрами, имеющими много возможных значений. Влияние отдельных параметров на результат расчета может быть весьма различным. Если оно достаточно мало, то неопределенностью соответствующего параметра можно для простоты пренебречь. Мера влияния параметров на результат расчета формализуется в понятии релевантности. С его помощью различные параметры упорядочиваются по степени их влияния.

Пусть нестационарное потокораспределение  $Z$  определяется векторами независимых неопределенных параметров  $X = x_1, \dots, x_L$  и зависимых (выбира-

емых) граничных условий  $Y = y_1, \dots, y_k$ :  
 $Z = Z(Y, X)$ . (2)

Интересно выяснить, как независимый параметр  $x_1$  с его возможными значениями  $x_{1j}, j = 1, \dots, n_1$  влияет на результат. Пусть реализации параметра  $x_1$  лежат в области

$$\min_j x_{1j} \leq x_1 \leq \max_j x_{1j}. \quad (3)$$

Будем считать, что все остальные независимые параметры принимают фиксированные средние значения:  $\bar{x}_m; m = 1, \dots, L, m \neq 1$ .

Влияние указанной области неопределенности параметра  $x_1$  при выбранном варианте решения  $Y$  измеряется так называемой абсолютной релевантностью  $R_{Y1}^a$  [1]:

$$R_{Y1}^a = \frac{j}{Z(Y, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_L)} - \frac{\min Z(Y, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_L)}{Z(Y, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_L)} \quad (4)$$

В уравнения, описывающие нестационарные процессы движения воды в трубопроводах, входит коэффициент сопротивления на трение по длине трубопровода  $\lambda$ . В стационарных расчетах аналогичный параметр называется также коэффициентом Дарси.

Величина  $\lambda$  зависит от распределения скоростей и ускорений по сечению трубопровода, от кинематической вязкости воды, шероховатости трубы, ее диаметра и ряда других параметров. Многообразие влияющих факторов и сложность их оценки приводят к тому, что аналитически определить значение коэффициента  $\lambda$  удается лишь в исключительных случаях, в частности для ламинарного стационарного режима течения жидкости.

В общем случае для оценки величины  $\lambda$  стационарного потока используют многочисленные экспериментальные данные, обрабатываемые статистическими методами с целью получения

эмпирических формул. К сожалению, в настоящее время отсутствуют достоверные данные для получения зависимости для  $\lambda$  в случае переходных процессов [6]. Не лучше обстоит дело и в теоретическом плане.

В сложившейся ситуации наиболее разумным выходом из положения является определение  $\lambda$  по формулам стационарных режимов, которые являются предельными для всех переходных процессов. При этом скорость  $v$  берут среднюю по сечению трубопровода. Такое рассмотрение не лишено противоречий. В частности, нулевая средняя скорость не гарантирует, что отсутствует движение жидкости и не происходит потерь напора на трение.

Принятие при расчетах коэффициента сопротивления на трение  $\lambda$ , соответствующего стационарным режимам движения жидкости в трубопроводах, позволяет иметь некоторый запас в расчетных колебаниях давлений при переходных процессах по сравнению с фактическими [6].

Анализ формул потерь напора показал, что их можно разбить на два класса: 1) формулы, использующие количественные оценки коэффициента шероховатости и 2) формулы, учитывающие его на вербальном уровне. К первым относятся формулы Колбрука–Уайта, Альтшуля, Френкеля и Исаева, ко вторым – формулы Шевелева и трехчленной зависимости. Оба подхода были реализованы в программе расчета, целью которого было определение  $\lambda$  по формулам разных авторов при различных шероховатостях  $\Delta_3$  и анализ полученных результатов. Коэффициенты шероховатости характеризуются слишком большим разбросом и дают лучшее согласование при значении  $\Delta_3$ , равном 0,5 мм, что больше рекомендуемых значений. На рис. 2 приведена лепестковая диаграмма для коэффициентов Дарси методов, расшифровка которых содержится в табл. 1.

Поскольку повышение напора  $\Delta H$  линейно зависит от скорости волны  $a$ , крайне важно знать, от чего зависит скорость распространения волн и как

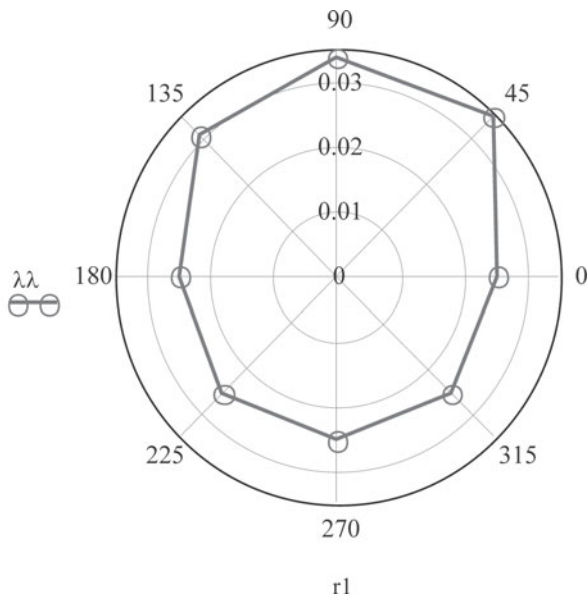


Рис. 2. Лепестковая диаграмма коэффициентов Дарси по формулам разных авторов (Δ₀ = 0,5)

Таблица 1  
Углы, диаграммы, соответствующие методам расчета

	0	1
0	45	Трехчленная зависимость
1	90	По формуле Шевелева:
2	135	новые чугунные трубы
3	180	новые стальные трубы
4	225	По формулам:
5	270	Колбрук–Уайта
6	315	Альтшуля
7	360	Френкеля
		Исаева

ее можно определить. В [6] отмечается, что скорость распространения волн для стальных, чугунных и железобетонных труб при незначительном количестве нерастворенного в воде воздуха составляет приблизительно 1000 м/с, однако в отдельных случаях она может снижаться до 400 м/с и даже меньше.

Для учета влияния нерастворенного в воде воздуха Л. Ф. Мошнин рекомендует проводить расчеты гидравлического удара при двух значениях скорости распространения волн: при отсутствии нерастворенного в воде воздуха  $a_1$  (практически при его очень малом количестве) и при значительном количестве нерастворенного в воде воздуха  $a_2 \approx 0,5a_1$ . Например, расчеты

рекомендуется проводить при следующих параметрах: для стальных и чугунных труб  $a_1 = 1000$  м/с и  $a_2 = 500$  м/с, для асбестоцементных  $a_1 = 600$  м/с и  $a_2 = 300$  м/с [6].

Было рассмотрено более 10 формул разных авторов для скорости распространения волн. Учитывая существенный разброс коэффициентов, невозможность точно задать объемное газосодержание, а также отсутствие в формулах некоторых влияющих факторов, например температуры, выделить одну из приведенных формул не представляется возможным [7]. С учетом этого сделаем заключение, что величина скорости звука в расчетах может меняться в диапазоне 500...1000 м/с [6]. Примем скорость распространения волны  $c$  в качестве одного из параметров в формуле релевантности (4). Входящие в эту формулу минимальное и максимальное значения данного параметра соответствуют границам указанного диапазона. Проведенные авторами расчеты релевантности показали, что влияние на ее значение скорости распространения волны намного превышает влияние других параметров.

В последнее время появился ряд программ математической направленности (MathCad, Matlab, Mathematica, Maple и др.), позволяющих относительно простыми средствами решать реальные научные задачи. В частности, в них есть специальные утилиты для решения уравнений в частных производных.

Рассмотрим решение поставленной задачи в системе MathCad. Потери на трение и местные сопротивления пока 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 –

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \tag{5}$$

уравнение количества движения –

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = 0. \tag{6}$$

Для решения подобных задач в MathCad есть стандартная утилита Pdsolve. Для простоты будем рассматривать время протекания процесса, при котором скорость воды, вытекающей из бака, сохраняет постоянное исходное значение. Тогда граничные условия будут иметь вид:

$$h(0, t) = H_0; \quad (7)$$

$$h(L, t) = H_0 + cv_0/g; \quad (8)$$

$$v(L, t) = 0; \quad (9)$$

$$v(0, t) = v_0. \quad (10)$$

Начальные условия достаточно очевидны:

$$h(x, 0) = H_0; \quad (11)$$

$$v(x, 0) = v_0. \quad (12)$$

Графики решения  $v(x, t)$  и  $h(x, t)$  соответствуют нашим представлениям о распространении ударной волны как во времени, так и в пространстве (рис. 3). Поверхности не имеют разрывов – это говорит об использовании в алгоритме механизма сглаживания, который «размывает» фронт волны.

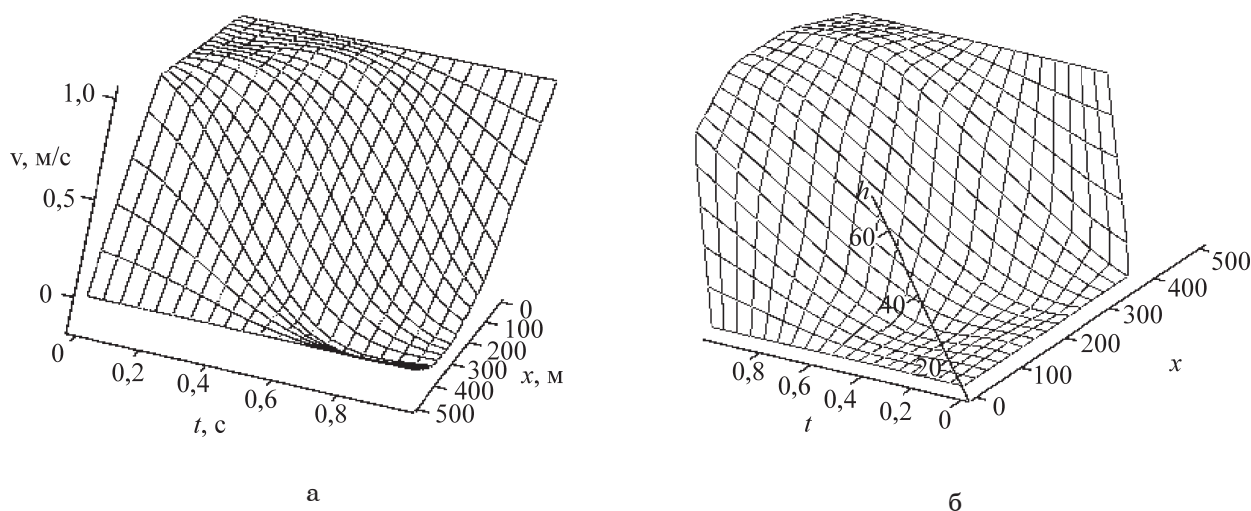


Рис. 3. Зависимости скорости и напора от  $t$  и  $x$ . Утилита Pdsolve: а – график решения  $v(x, t)$ ; б – график решения  $h(x, t)$

Эта задача была решена методом конечных разностей, для которого был создан собственный код интегрирования дифференциальных уравнений. Будем рассматривать только изменение скорости потока  $v(x, t)$ .

График численного решения приведен на рис. 4. Из рисунка видно, что он имеет общие черты с решением, полученным стандартной процедурой.

Нельзя не отметить, что полученное решение имеет флуктуации, не характерные для процесса. Они имеют численное происхождение и связаны с тем, что на фронте ударной волны решение не дифференцируемо. Рассмотрим еще один численный метод. Ниже приводятся результаты аппроксимации системы (5)...(6) конечно-разностными соотношениями со вторым порядком

точности по двухшаговой схеме Мак-Кормака [4]. Интегрирование проведено методом сквозного счета, т.е. возникающие в потоке ударные волны не выделяются и проявляются в виде

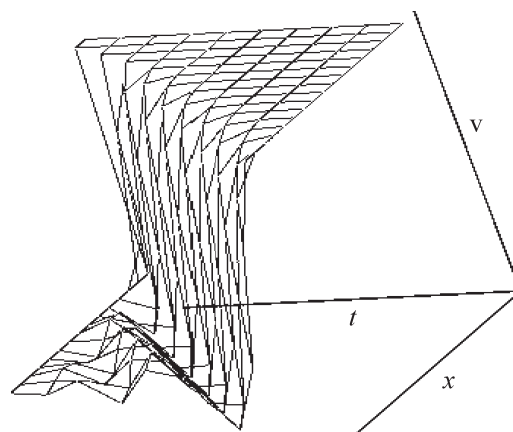


Рис. 4. Поверхность скорости, полученная методом конечных разностей:  $v(x, t)$

сильных градиентов соответствующих параметров решения. Обычно в этом случае ударные волны «размазываются» на 2-3 интервала  $\Delta x$ .

Численные алгоритмы основаны на методе Рунге–Кутты для решения обыкновенных дифференциальных уравнений. Поэтому, для того чтобы по известному  $f(t)$

получить решение на следующем шаге по времени  $f(t + \Delta t)$ , необходима одна или несколько итераций. Для повышения устойчивости счета решение сглаживается по  $x$  на каждом временном шаге. Решение приведено на рис. 5. Графики почти не содержат численных флуктуаций и в целом соответствуют стандартному решению.

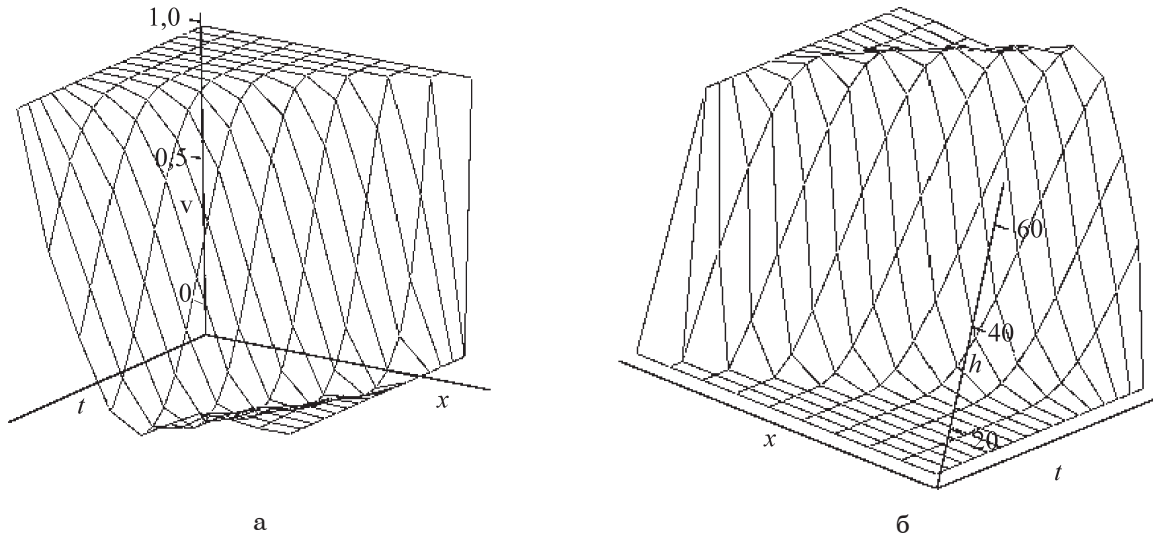


Рис. 5. Решения для  $v(x, t)$ ,  $h(x, t)$ , полученные методом Маккормака:  
а –  $v = v(x, t)$ ; б –  $h = h(x, t)$

Преимуществом метода Маккормака по сравнению со стандартной процедурой и методом аппроксимации является возможность управлять процессом решения, корректируя его в зависимости от постановки задачи, и получать решение с минимальными погрешностями вычислительного характера.

Исходная система уравнений допускает так называемую характеристическую форму, играющую исключительно важную роль при формулировке краевых (начальных и граничных) условий. Кроме того, свойства характеристик широко используются при численном решении уравнений. Решение методом характеристик приведено на рис. 6.

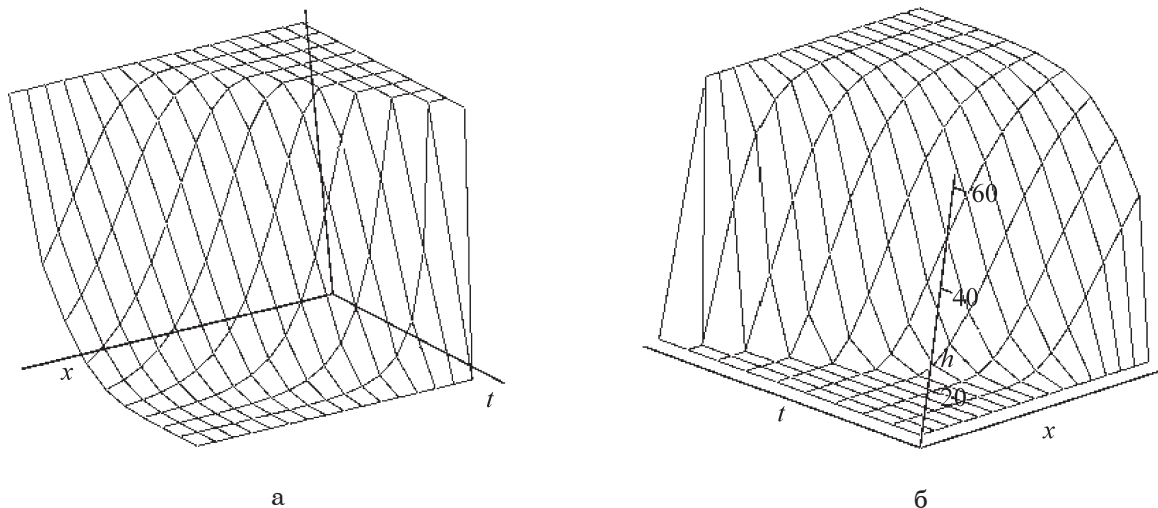


Рис. 6. Решения, полученные методом характеристик:  
а –  $v = v(x, t)$ ; б –  $h = h(x, t)$

Будем искать решение задачи (5)...(12) для напора методом разделения переменных. График решения представлен на рис. 7. Решение в наибольшей степени соответствует нашим представлениям о гидравлическом ударе и, в отличие от численных, доступно

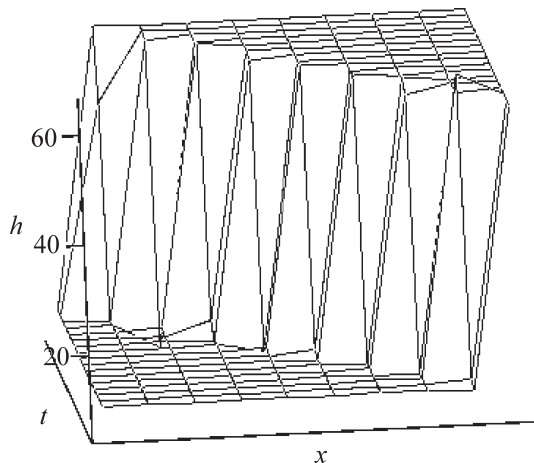


Рис. 7. Решение, полученное методом разделения переменных:  $h = h(x,t)$

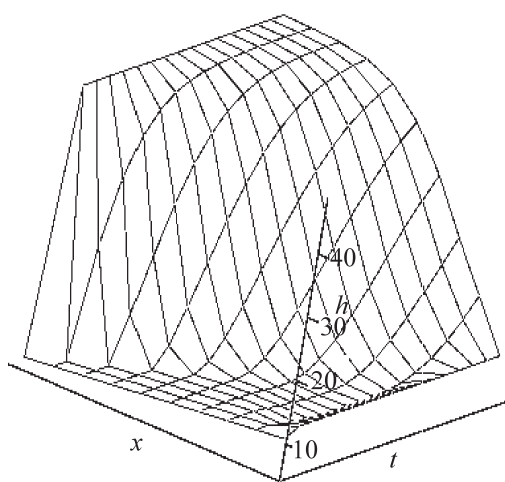
для дальнейшего аналитического анализа. Строго говоря, машинная реализация полученного интеграла не является точной, так как связана с погрешностями ограниченной разрядности компьютера и с заменой беско-

нечного ряда конечным. Эти ошибки минимальны по сравнению с численными решениями, где наибольший вклад в неточность вносят погрешности методов. Кроме того, основные различия касаются фронта ударной волны и связаны с эффектом Гиббса, что на практике не имеет большого значения.

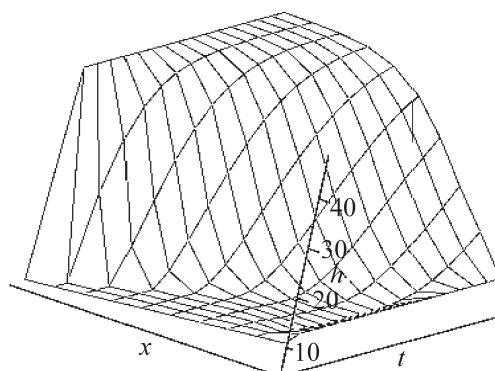
Приводимые результаты основаны на расчетах, не учитывающих диссипативный член  $\frac{\lambda v |v|}{2d}$  – потери на трение в уравнении количества движения.

Учет диссипативного члена ввиду его нелинейности может оказаться критичным в методе разделения переменных. Линеаризация уравнения может существенно исказить решение. Остальные из рассмотренных методов позволяют учесть диссипативный член без дополнительных упрощений. Приведем результаты для  $h(x, t)$ , полученные методами Маккормака, и характеристик с учетом потерь на трение (рис. 8).

Перейдем к рассмотрению влияния на расчет переходных процессов рассмотренных факторов: метода расчета, коэффициента Дарси, скорости распространения волн, уровня воды в баке, начальной скорости. Сравнительные характеристики методов сведены в табл. 2.



а



б

Рис. 8. Учет потерь на трение по методу характеристик (а) и по методу Маккормака (б):  $h = h(x,t)$

Таблица 2

Сравнение методов интегрирования уравнений гидроудара

	Метод					
	Разделения переменных, $k = 150; \lambda = 0$	Конечных разностей, $\lambda = 0$	Маккор-мака, $\lambda = 0$	Характеристик, $\lambda \neq 0$	Маккор-мака, $\lambda \neq 0$	Характеристик, $\lambda \neq 0$
$t/t_{\text{пр}}$	1	0,323	0,971	0,845	1,106	1,067
$\Delta h_{\text{max}}$ М	4,58	—	7,76	0	5,15	0
$\Delta h_{\text{min}}$ М	4,49	—	0	0	4,47	4,58
$\Delta v_{\text{max}}$ М/с	—	0	0	0	0	0
$\Delta v_{\text{min}}$ М/с	—	0,216	0,152	0	0,123	0,028

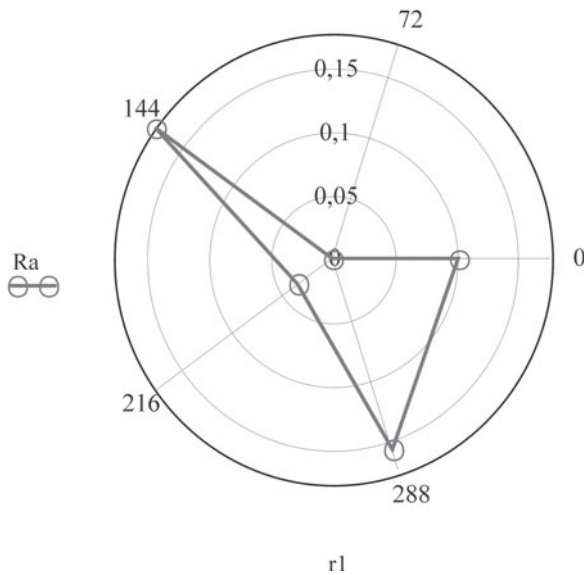


Рис. 9. Лепестковая диаграмма релевантностей

Здесь разности понимаются как абсолютные отклонения полученных решений от точного,  $t/t_{\text{пр}}$  – относительное время расчета, где за основу принято время метода разделения переменных при 150 членах ряда.

В заключение приведем результаты расчетов коэффициентов релевантности по формуле (4) при вариации методами расчета, коэффициентами Дарси, скоростями распространения волн, начальными напорами и скоростями.

Лепестковая диаграмма и соответствие параметров приведены на рис. 9 и в табл. 3. При этом рассматривались метод характеристик и метод Маккор-мака, так как они оба учитывают гидравлическое сопротивление и являются абсолютно сопоставимыми. Все остальные числовые параметры варьировались в пределах  $\pm 10\%$  от наиболее

Таблица 3

Угловая расшифровка параметров

	0	1
0	0	Метод
1	72	$\lambda$
2	144	Скорость волны
3	216	Напор воды в баке
4	288	Начальная скорость

ожидаемых значений [максимальные и минимальные значения в формуле (4)].

Таким образом, при оценке максимальных напоров можно пренебречь вариациями коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  и начальным напором  $H_0$ . Это объясняется тем, что максимальный напор наблюдается у башни (см. рис. 1), где потери напора по длине практически нулевые.

**Вывод**

Величины начальной скорости  $v_0$ , скорости звука  $c$  и метод расчета оказались значимыми. Диапазон их возможных значений необходимо учитывать при расчетах. Причину отдельных результатов легко понять из формулы Жуковского.

Следует отметить, что эти выводы сделаны на простейшем модельном примере и должны быть проверены при проведении более сложных расчетов.

1. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений; пер. с нем. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
2. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров; пер. с англ. – М.: Мир, 1985 – 384 с.
3. Семененко М. Т. Математическое моделирование в MathCad. – М.: Альтекс-А,



2003. – 208 с.

4. **Warming R. F., Kutler P., Lomax H.** (NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif.) Second and Third-Order Noncentered Difference Schemes for Nonlinear Hyperbolic Equations // AIAA Journal. – 1973. – V. 11. – № 2. – P. 189–196.

5. **Фокс Д. А.** Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах; пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.

6. **Вишневский К. П.** Переходные процессы в напорных системах водоподачи. – М.: Агропромиздат, 1986 – 135 с.

7. **Карамбиров С. Н.** Математическое моделирование систем подачи и рас-

пределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2004. – 196 с.

Материал поступил в редакцию 29.04.09.

**Карамбиров Сергей Николаевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Вычислительная техника и математическое программирование»

Тел. 8 (499) 153-97-66

E-mail: karamba\_msuee@mail.ru

**Бегляров Давид Суменович**, доктор технических наук, профессор

Тел. 8 (495) 976-11-85

**Лиханов Дмитрий Михайлович**, ассистент кафедры «Водоснабжение»

Тел. 8-905-217-22-70

УДК 502/504 : 626.83 : 532.5

**Д. С. БЕГЛЯРОВ, И. Ю. САХАРОВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАПАНОВ ВПУСКА И ЗАЦЕМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОДОВОДОВ ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА**

*В статье представлены результаты расчетно-теоретических исследований переходных процессов в напорной системе водоподачи с насосной станцией при наличии средств защиты от гидравлического удара.*

*Напорная система водоподачи, насосная станция, насос, напорный трубопровод, клапан для впуска и заземления воздуха, обратный клапан.*

*In the article there are given results of the design – theoretical studies of transient processes in the pressurized water supply system with the pumping station under the presence of protection means from hydraulic impact.*

*Pressurized water supply system, pumping station, pump, pressurized pipeline, air inlet and jam valve, back-pressure valves.*

Рассмотрение причин аварий на трубопроводах коммунальных, промышленных водоводов и трубопроводах мелиоративных насосных станций показывает, что значительное количество аварий на трубопроводах происходит в результате гидравлических ударов.

К настоящему времени имеется

целый ряд работ, посвященных расчету максимального повышения давления. Примером могут служить работы Л. Бержерона, Л. Ф. Мошниной, А. А. Сурина, И. А. Чарного, Н. А. Картвелишвили, В. С. Дикаревского, К. П. Вишневского, В. М. Алышева и др. Гидравлический удар рассчитывают