

К. Г. Асатур

Гидравлический удар в трубопроводах с диаметром и толщиной стенки, непрерывно меняющимися по длине

В тех случаях, когда геометрические параметры, диаметр и толщина стенки непрерывно меняются по длине трубы, расчет гидравлического удара представляет собой задачу, не решаемую в квадратурах.

Уделенное ей исследователями внимание, вызванное стремлением к теоретическим обобщениям, оправдывается также и требованиями практики. В частности, существенной является возможность упрощения, таким путем, расчета трубопроводов со скачкообразно меняющимися параметрами, при большом числе составных участков.

Еще Аллиев постулировал возможность, в качестве приближения, замены фактического трубопровода с переменными геометрическими параметрами условным расчетным с постоянными параметрами, на основе равенства кинетических энергий в обоих трубопроводах.

Расчету „простых“ трубопроводов, для которых диаметр и скорость распространения волны меняются линейно по длине, посвятил большую работу Фавр [1].

Для трубопроводов, как угодно составленных из участков с непрерывно меняющимися параметрами, Н. Т. Мелешенко предложил способ расчета, основанный на применении характеристик дифференциального уравнения гидравлического удара, которое им было представлено [2] в виде¹

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \omega \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{a^2}{\omega} \right) \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где W — функция, удовлетворяющая условиям

$$\frac{\partial W}{\partial t} = Q, \quad (2)$$

¹ Потери напора на сопротивление движению не принимаются во внимание. Рассматриваемое решение может быть дополнено учетом их согласно установленной в настоящее время методике (см., например, [2]).

$$\frac{\partial W}{\partial x} = eh, \quad (3)$$

а прочие буквы обозначают: t —время, x —координатную ось трубы, направленную навстречу текущей воде, расход Q которой считается положительным, h —пьезометрический напор, ω —площадь сечения трубы, „ a “—скорость распространения волны нарушения, которую, так же как и величину „ e “

$$e = \frac{g\omega}{a} \quad (4)$$

можно рассматривать как некоторые, непрерывно меняющиеся вместе со своими производными, „геометрические“ параметры, при условии, что жидкость и материал стенок трубы для расчетного участка однородны, а диаметр и толщина стенок трубы меняются по длине непрерывно.

Способы Фавра и Мелешенко построены на методах приближенного интегрирования. Необходимая при расчете разбивка аргументов на отрезки с осредненными значениями неизвестных функций производится у Фавра по аргументу времени, а у Мелешенко—по координатной оси трубы. На примерах расчетов Фавр обнаружил большое влияние времени регулирования задвижки на величину напоров в коническом трубопроводе, откуда становится ясным значение фактора времени при расчетном дроблении аргументов.

Если в уравнении (1) аргументы x и t заменить характеристиками

$$\xi = t - \int \frac{dx}{a}, \quad (5)$$

$$\eta = t + \int \frac{dx}{a}, \quad (6)$$

то оно примет канонический вид

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \eta} = -n \left(\frac{\partial W}{\partial \eta} - \frac{\partial W}{\partial \xi} \right), \quad (7)$$

где n —„геометрический“ параметр

$$n = \frac{a}{4} \left(\frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dx} - \frac{1}{a} \frac{da}{dx} \right). \quad (8)$$

Из (2) и (3), при этом, получим значения функций Н. Е. Жуковского:

$$\frac{\partial W}{\partial \xi} = S = \frac{1}{2} (Q - eh) \quad (9)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \eta} = R = \frac{1}{2} (Q + eh) \quad (10)$$

Правой частью уравнения (7) учитывается изменяемость геометрических параметров трубы по длине; при $\omega = \text{const}$, $a = \text{const}$ имеем $p=0$.

Уравнение (7) получено А. Н. Бровковичем [3], решившим его путем разложения искомых функций в ряд, по степеням малого параметра, определяя неизвестные внутри областей, оконтуренных частично характеристиками. Прикладное значение такого способа расчета, несмотря на его теоретическую ценность, не велико из-за сложности, явившейся в значительной мере результатом отказа Бровковича от ведения расчета „только вдоль характеристик“. Вследствие этого, оказались неиспользованными преимущества характеристик, заключающиеся в независимом от граничных условий характере представляющих их зависимостей.

Мы рассмотрим способ приближенного интегрирования уравнения (7), руководящим началом в котором является идея ведения расчета только вдоль характеристик. Такой подход приводит к единому методу исследования неустановившегося движения жидкостей, который впервые был применен Н. Е. Жуковским для труб, а за последнее время получил особенно глубокое развитие в работе акад. С. А. Христиановича, посвященной открытым руслам¹.

Для графической интерпретации нашего исследования, на верхней координатной полуплоскости t, x , в пределах полосы, заключенной между прямыми $x=0$ и $x=L$, отвечающей расчетной области для участка трубы длиной L с непрерывно меняющимися параметрами, нанесем сетку характеристик ξ, η (фиг. 1); она составит из двух семейств эквидистантных кривых; угол, образуемый касательными к этим кривым с осью x , равный $\arctg\left(\pm \frac{1}{a}\right)$, является непрерывной функцией от x . Кривые ξ и η для практических случаев можно представлять в виде прямых—по среднему значению $\left|\frac{1}{a}\right|$ на участке или его отрезке.

Выделенная нами полоса верхней полуплоскости, при интегрировании уравнения (7), является составной частью плана характеристик сложного трубопровода.

Подставим (9) и (10) в (7); проинтегрировав (7), сначала в предположении $\xi = \text{const}$, потом $\eta = \text{const}$, получим зависимости

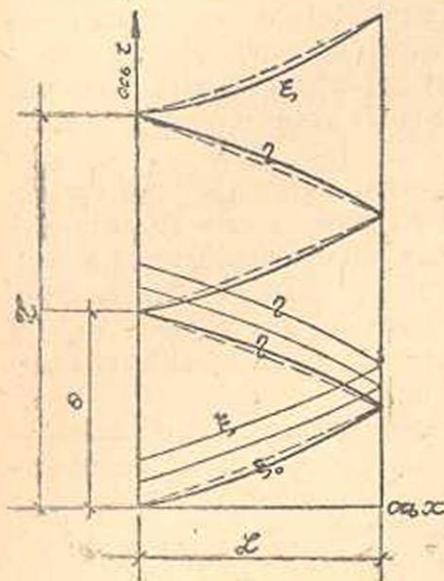
$$S = S_0 - \int_{\tau_0}^{\tau_1} n e h d\eta \quad (11)$$

¹ Метод характеристик в математике основан Д'Аламбером, а затем развит Риманом.

$$R = R_L - \int_{\xi_L}^{\xi} \eta e h d\xi, \quad (12)$$

определяющие характеристики в форме интегральных уравнений.

$$\frac{\partial \xi}{\partial \tau} = m; \quad m - \text{целое}$$



Фиг. 1.

Взамен обычной формы двух дифференциальных уравнений для характеристик каждого из семейств мы имеем одно интегральное уравнение, заключающее в себе также свои начальные условия, которые для функции S , в уравнении (11), будут значениями на границе $x=0$, а для функции R , в (12), значениями на $x=L$, что отмечено соответствующими индексами при них.

Ядро уравнений (11) и (12) — непрерывная функция x , а следовательно ξ , при $\eta = \text{const}$, и η , при $\xi = \text{const}$. Если предположить, как это делал Жуковский, что параметры трубы по длине постоянны, то $p=0$ и последние члены в (11) и (12) будут отсутствовать [4]. Подинтегральная неизвестная h , как ясно из предыдущего, выражается через S и R .

Решения уравнений (11) и (12) будут правильными в области, в которой соблюдены условия непрерывности функций Жуковского, что с гидравлической стороны отвечает медленно изменяющемуся движению.

Если, кроме того внутри расчетной полосы плана характеристик непрерывны частные производные функций Жуковского, то движение на данном участке по терминологии Христиановича будет представлять собой одну волну.

В тех случаях, когда условия непрерывности функций соблюдены, операции с уравнениями характеристик представляют собой пользование методом Жуковского с добавлением тех же граничных уравнений [4]; отличие состоит лишь в том, что здесь значения функций Жуковского вдоль характеристик переменны, что обусловлено изменяемостью криволинейных интегралов в (11) и (12). Кроме того, эти интегралы выражаются через аргументы лишь при посредстве бесконечных рядов. Все это осложняет определение искомых величин из уравнений (11) и (12).

Введем новую переменную

$$\chi = \frac{x}{L} \quad (13)$$

$$0 < \chi < 1 \quad (14)$$

Из (5) и (6) имеем

$$\text{при } \xi = \text{const}; d\eta = \frac{2L}{a} d\chi; \quad (15)$$

$$\text{при } \eta = \text{const}; d\xi = \frac{2L}{a} d\chi. \quad (16)$$

Так как $pe = p(X)e(X)$ то, подставив (13) (15) и (16) в (11) и (12) и умножив их на 2, получим

$$2S = 2S_0 - \int_0^\chi K(X)h(X)dX \quad (17)$$

$$2R = 2R_L + \int_1^\chi K(X)h(X)dX \quad (18)$$

$$K(X) = g \frac{d}{dX} \left(\frac{\omega}{a} \right) \quad (19)$$

Для решения уравнений (17) и (18), воспользуемся способом, в котором неизвестные функции в подынтегральных выражениях представляются сколь угодно точно с помощью ряда натуральных степеней аргумента χ , удовлетворяющего условию (14).

Имеем: в уравнении (17)

$$h = \sum M_n \chi^n \quad (20)$$

$$Q = \sum M'_n \chi^n, \quad (21)$$

в уравнении (18)

$$h = \sum N_n (1-\chi)^n \quad (22)$$

$$Q = \sum N'_n (1-\chi)^n \quad (23)$$

Согласно граничным условиям коэффициенты при нулевой степени

$$M_0 = h_0; M'_0 = Q_0; N_n = h_L; N'_0 = Q_L \quad (24)$$

являются известными нам значениями h и Q на $x=0$ и $x=L$, соответственно отмеченными индексами при h и Q .

Подставив (20) (21) (22) и (23) в (17) и (18) и учтя при этом (9) и (10), получим

$$\sum M'_n \chi^n - g \sum M_n \frac{\omega}{a} \chi^n = 2S_0 - \sum M_n \int_0^\chi K \chi^n d\chi \quad (25)$$



$$\Sigma N_n (1-\chi^n) - g \Sigma N_n \frac{\omega}{a} (1-\chi)^n = 2R_L + \Sigma N_n \int_1^\chi K(1-\chi)^n d\chi \quad (26)$$

Ограничившись в уравнении (25) или (26) членом ряда разложения со степенью i , мы получим в нем $2i$ неизвестных коэффициентов ряда. Подставив в это уравнение произвольное частное значения аргумента χ между 0 и 1, мы получим уравнение относительно неизвестных коэффициентов ряда. Таких уравнений для определения коэффициентов, по числу неизвестных, должно быть $2i$. Поэтому, учитывая наличие еще граничного уравнения, в рассматриваемое уравнение нужно подставить $2i-1$ произвольных частных значений χ , из которых одно должно соответствовать сечению, отвечающему граничному уравнению.

Недостаток этого способа заключается в том, что с увеличением числа уравнений относительно неизвестных коэффициентов вычисления усложняются. Поэтому мы рассмотрим другой, более удобный для практики способ решения уравнений характеристик.

Уравнения (17) и (18) имеют два вида членов: одни из них выражены явно от искомых функций, в других — искомые функции находятся под знаком интеграла. В предыдущем способе подстановка неизвестных, представленных в виде ряда, производилась во все члены уравнения характеристик. Во втором способе будем делать подстановку только в подынтегральные неизвестные функции; следовательно, в этом способе производится приближенный учет лишь факторов, учитывающих изменчивость геометрических параметров по длине. Для выражения неизвестных функций будем брать только члены ряда с первыми степенями.

Имеем: в уравнении (17)

$$h = h_0 + M\chi \quad (27)$$

в уравнении (18)

$$h = h_L + N(1-\chi). \quad (28)$$

Сделав подстановку, получим

$$Q_L - \frac{q\omega_L}{a_L} h_c = Q_0 - \frac{g\omega_0}{a_0} h_0 - \int_0^1 K(h_0 + M\chi) d\chi \quad (29)$$

$$Q_0 + \frac{g\omega_0}{a_0} h_0 = Q_L + \frac{g\omega_L}{a_L} h_L + \int_1^0 K[h_L + N(1-\chi)] d\chi \quad (30)$$

Подставив в (27) $\chi=1$, а в (28) $\chi=0$, получим

$$M = -N = h_L - h_0. \quad (31)$$

Так как

$$\frac{g \omega_L}{a_L} = \frac{g \omega_0}{a_0} + g \int_0^L \frac{d}{dx} \left(\frac{\omega}{a} \right) dx = \frac{g \omega_0}{a_0} + \int_0^L K dx,$$

то, введя обозначение

$$e^* = g \left[\frac{\omega_0}{a_0} + \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{d}{dx} \left(\frac{\omega}{a} \right) dx \right], \quad (32)$$

уравнениям (29) и (30) можно дать следующий окончательный вид:

$$2S^*_L = Q_L - e^* h_L = Q_0 - e^* h_0 = 2S^*_0 \quad (33)$$

$$2R^*_0 = Q_0 + e^* h_0 = Q_L + e^* h_L = 2R^*_L. \quad (34)$$

В (33) и (34) S^* и R^* не являются функциями Жуковского; их значения в точках пересечения данной характеристики с обеими границами расчетной полосы одинаковы, вследствие чего между уравнениями (33) и (34) и решением Жуковского для трубы с постоянными параметрами имеется некоторая аналогия, которая для принятой степени приближения задачи, условно, позволяет ввести соответствующую замену при расчете.

Условно постоянный параметр e^* заменяющего расчетного трубопровода в (33) и (34) отвечает некоторому промежуточному сечению рассматриваемого участка трубы и может быть определен из (32) для любого вида функциональной зависимости параметров трубы от x .

Функции S^* и R^* будем называть „заменяющими“ функциями Жуковского.

Уравнения (33) и (34) должны решаться совместно с граничными уравнениями обычного вида, в которых места фактических величин занимают заменяющие, обозначенные звездочками.

При таком способе интегрирования уравнения (7) представление напора в первой его части в виде линейной функции на длине участка трубы является единственным допущением. Однако и эта степень приближения может быть повышена за счет условного деления расчетной полосы участка на части границами $x = \text{const}$, проходящими через промежуточные точки оси; при этом к расчетным уравнениям должны быть добавлены написанные для соответствующих промежуточных сечений „граничные уравнения“, подобные составляемым для точек разрыва геометрических параметров трубы. Таким образом, действительная кривая напоров заменяется приближенно выражающей ее ломаной.

Уточнение получается само собой, если требуется определение значений напоров и расходов в промежуточных сечениях участка.

До сих пор мы предполагали, что функции Жуковского и их частные производные во всей расчетной области непрерывны. Это

условие для интеграла уравнений (7) соблюдается, как известно, в треугольнике, образованном характеристиками ξ и η , если функции непрерывны на прямой $x=0$ служащей основанием треугольника.

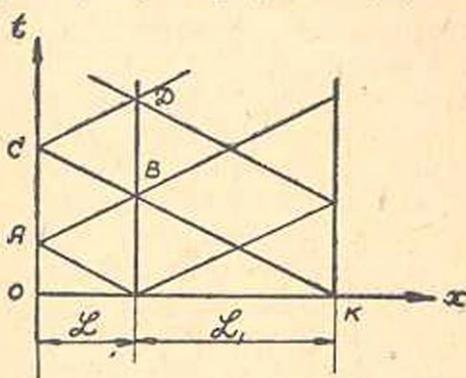
Функции, которые, оставаясь ограниченными, терпят разрыв непрерывности в конечном числе точек на прямой $x=0$, будут иметь два меняющихся значения на длине характеристик, проходящих через точку разрыва на $x=0$.

Можно доказать, что для трубопроводов, состоящих из участков ограниченной длины, разность двух значений функции в каждой точке характеристики остается отличной от нуля, как правило, также и после отражения и преломления на границе, отвечающей узлу пересечения участков или разрыву геометрических параметров трубопровода.

Разрывы функций на границе $x=0$, отвечающей задвижке, в практических случаях будут иметь место; эти разрывы зависят от характера кривой относительного открытия μ задвижки в функции от времени. Можно доказать, что в точках разрыва кривой $\mu=f(t)$ двум значениям открытия промежутка $0 \leq \mu \leq 1$ будут отвечать два значения S , а в точках перелома кривой будет иметь два значения производная $\frac{\partial S}{\partial t}$. При этом все функции остаются ограниченными в расчетной области для практических случаев всегда.

Сокращая изложение, справедливость всего сказанного можно показать, ограничившись выяснением особенностей частного случая отражения функции Жуковского; рассуждения, при этом, будут иметь общий характер.

Пусть, например, на границе $x=0$, в одной только точке А (фиг. 2), терпит разрыв непрерывности, оставаясь при этом ограниченной, функция S . Покажем, что для случая, когда граница $x=L$ отвечает разрыву геометрических параметров трубопровода, это нарушение непрерывности функции S приводит к разрыву функции S в точке С.



Фиг. 2

Граничное уравнение в точке В можно представить в виде

$$R_{BC} = \frac{S_{BA} (e - e_1) + 2e_1 R_{BK}}{e + e_1}, \quad (35)$$

где первая буква индекса при S или R относится к точке, в которой взята функция, вторая — указывает направление на характеристике.

Имеем $e \neq e_1$. Так как R_{BK} , связанная с R_{KB} , не зависит от S_{BA} , характер изменения R_{BC} определяется характером изменения S_{BA} .

По условию, приближаясь к точка А, на прямой $x=0$ с двух сторон, мы имеем два разных значения S_{AB} . Поэтому приближаясь, с двух сторон по прямой $x=L$, к точке В, мы получим два разных значения S_{BA} , при этом в общем случае мы получим из (35) два значения R_{BC} , откуда следует, что при приближении к точке С, на прямой $x=0$ с двух сторон, мы будем иметь два разных значения R_{BC} .

Непрерывность функций Жуковского при интегрировании уравнения (7) играет важную роль. Разрыв подинтегральных функций в последних членах уравнений (11) и (12) в данном случае требует разбивки длины аргумента на отрезки точками, отвечающими разрывам функций.

Поэтому, при мгновенном ударе, вследствие разрыва $\mu=f(t)$, на полосе плана от границы $x=0$ до границы $x=L$ уравнения (11) и (12) можно применять только к главным характеристикам луча, идущего из точки разрыва на границе $x=0$, так как все прочие характеристики с ним пересекаются; следовательно, в этом случае мы не можем пользоваться расчетной плоскостью полосы непрерывно.

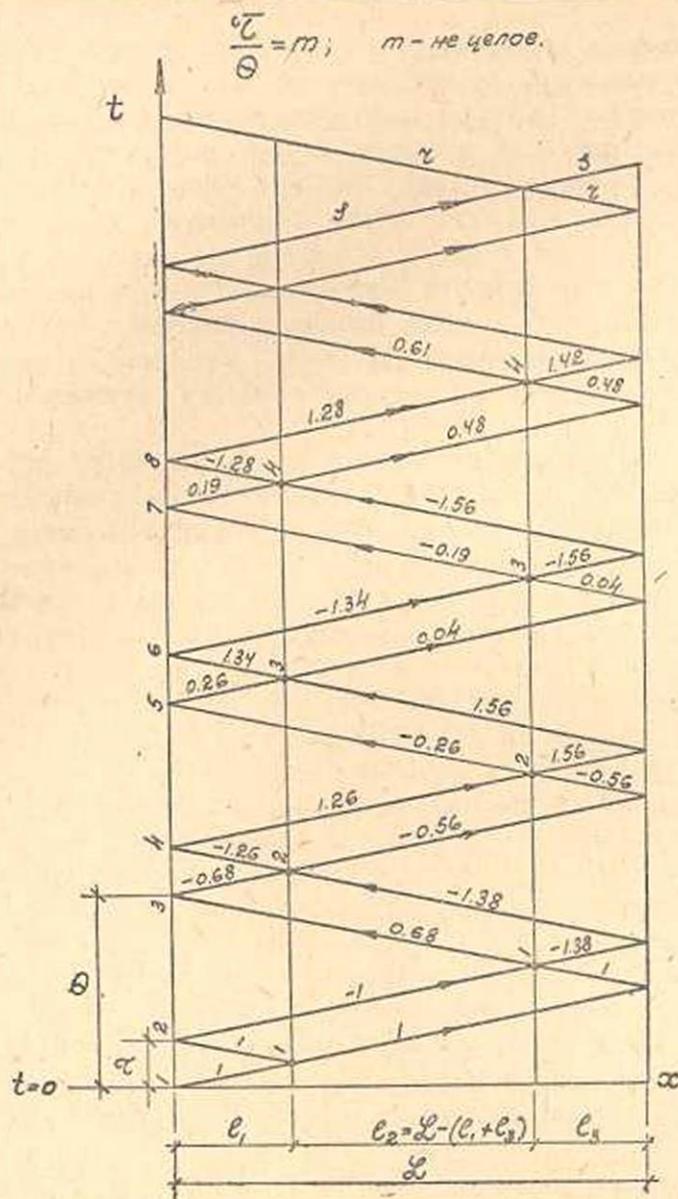
Для рассматриваемого приближенного решения существенное значение имеет также непрерывность частных производных функции Жуковского. Уравнения (33) и (34) получены из (11) и (12) при линейном представлении функции напора (h). Немаловажной является допустимость такого приближения только на участках между точками перелома h ; несоблюдение данного условия, обеспечивающегося при непрерывности частных производных, S и R внутри полосы приводит к тому, что расчет искажает общую действительную картину явления.

При линейном изменении открытия задвижки разрыв производных S и R будет иметь место на характеристиках, пересекающихся с лучами главных характеристик, идущими из начальной и конечной точек регулирования. Эти два луча главных характеристик будут совпадать при кратности времени действия задвижки τ и продол-

жительности фазы в участке трубы $\Theta = 2 \int_0^L \frac{dx}{a(x)}$ (фиг. 1) и будут

пересекаться, создавая сетку, если эти промежутки времени не кратны. На фиг. 3 интерпретирован случай некротной точки перелома на границе $x=0$ при прямом ударе в простом трубопроводе.

Легко видеть, что уравнения (33) и (34), относящиеся к крайним сечениям расчетного участка, должны применяться только к характеристикам главных лучей, берущих начало в конечной и начальной точках регулирования, причем, несовпадение этих лучей вызывает необходимость обязательного вычисления значений функций в узлах сетки, показанных на фиг. 3 жирными точками. Это приводит к разбивке участка трубы на отрезки с добавлением к расчетным



уравнениям „граничных условий“ для узловых сечений получившихся отрезков.

Для случая, изображенного на фиг. 3, требуемое число отрезков равно трем, из которых длина крайних определяется временем пробега волною пути за промежуток времени регулирования задвижки; при этом расчетные геометрические параметры осреднены на каждом отрезке участка,

Разбивка участка, входящего в состав сложного трубопровода, на расчетные отрезки обусловлена не только отношением времени ре-

гулирования и продолжительности фазы в нем, но и кратностью фаз в различных участках трубопровода, так как путь луча на плане характеристик определен характером отражения и преломления его на границах полос.

Расчет мгновенного удара является предельным, для данного расчета, случаем, когда промежуток времени между началом и концом регулирования бесконечно мал. Это значит, что на $x=0$ будет бесконечно мало расстояние между точками 1 и 2, (фиг. 3) 3 и 4, 5 и 6 и так далее; оба луча сетки полностью совместятся, приняв изображение, какое мы имели на фиг. 1, причем функции напора и расхода по обе стороны совмещенного луча будут иметь разные значения; в каждой точке, мы будем находить два значения искомых функций, для чего параметры крайних расчетных отрезков участка, длины которых получаются бесконечно малыми, нужно принимать равными параметрам крайних сечений.

Если открытие задвижки меняется двумя последовательными скачками через промежуток времени, не кратный продолжительности фазы в участке трубы, то будем иметь сетку из двух пар совмещенных лучей (см фиг. 3).

Число расчетных точек на плане полосы можно не ограничивать узлами сетки, но практической необходимости в этом может не оказаться.

Так, например, в расчетах, выполнявшихся с целью определения напоров и расходов в крайних сечениях участков трубопроводов, дополнительные точки ощутительного увеличения точности результатов не дали.

Это объясняется тем, что изменение напора по длине характеристики, между точками перелома, при линейном изменении открытия задвижки, мало отклоняется от линейного закона. Разница в величине площади, определяемой интегралами уравнений характеристик при фактическом и линейном изменении напора, не должна быть значительной. По этой же причине, напоры и расходы в промежуточных сечениях, во многих случаях практики, достаточно определять путем линейной интерполяции на длине расчетного луча или сторов сетки и внутри околнуренных ими областей на плане характеристик.

Все сказанное подтверждает существенную роль аргумента времени, определяющего главные условия дробления участка трубы на расчетные отрезки, поскольку соответствующие условия по оси трубы обычно всегда бывают соблюдены.

— Резюмируем полученные результаты.

Аналогия между расчетами гидравлического удара в трубах с переменными и с постоянными геометрическими параметрами соответствует степени приближения, определенной условием принятия линейного изменения напора в членах уравнений характеристик, которые учитывают изменяемость параметров трубопровода на длине рассматриваемого участка.

Условно постоянный параметр заменяющей расчетной трубы e^* , входящий в разрешающие уравнения, должен при этом браться по формуле (32), позволяющей определить его для любого характера изменения диаметра и толщины стенки по длине участка.

В основу расчетных операций определения расходов и напоров могут быть положены функции Жуковского для заменяющей трубы, то-есть уравнения (33) и (34).

Отличие характера таких операций от расчета по методу Жуковского заключается в том, что непрерывное пользование полосами плана характеристик здесь, в обычных случаях, недоступно вследствие наличия точек разрыва функций Жуковского и их производных. При мгновенном ударе и линейном изменении открытия задвижки уравнения характеристик можно применять только к лучам главных характеристик, берущих начало в точках разрыва на границе, отвечающей задвижке с разбивкой участка на расчетные отрезки, обязательной при наличии некоторых условий, в которых определяющую роль играет характер зависимости функций от времени.

Предложенный способ интегрирования уравнения (7) позволяет получить разрешающие уравнения, лежащие в основе других приближенных способов как следствия, вытекающие из одних и тех же уравнений (11) и (12). Кроме принятия для функции напора линейного приближения, нужно для этого ввести в (11) и (12) дополнительные допущения, чем мы здесь заниматься не будем.

Применение предлагаемого способа расчета и сопоставление его с другими иллюстрируется на примере, из которого видно, что при практически одинаковой точности он позволяет сэкономить труд расчетчика и в некоторых случаях весьма значительно.

В конкретных расчетах уравнениями (33) и (34) удобно пользоваться в относительных величинах, поэтому представим их в следующем виде.

$$s_{*L}^* = q_L - \varepsilon^* \bar{h}_L = q_0 - \varepsilon^* \bar{h}_0 = s_{*0}^* \quad (41)$$

$$r_{*0}^* = q_0 + \varepsilon^* \bar{h}_0 = q_L + \varepsilon^* \bar{h}_L = r_{*L}^* \quad (42)$$

Обозначения в (41) и (42) следующие:

$$q = \frac{Q}{Q_{00}}, \quad \bar{h} = \frac{h}{h_{00}}; \quad \varepsilon^* = e^* \frac{h_{00}}{Q_{00}}, \quad (43)$$

где h_{00} — начальное значение пьезометрического напора над центром тяжести задвижки, а Q_{00} — расход при этом напоре, полном открытии задвижки и установившемся движении в трубопроводе.

Отсчет напоров будем производить от начального уровня напорного бассейна.

В качестве примера возьмем конический трубопровод, рассчитанный Мелещенко и заимствованный им у Фавра.

Изменение диаметра трубопровода по длине удовлетворяет зависимости:

$$D = 2(1 + 0,168 X).$$

Скорость распространения волны в трубе меняется по закону
 $a = 1150(1 - 0,31X)$.

Длина трубопровода 500 м. Задвижка закрывается полностью в течение 0,2 сек.

Время пробега волною всей длины трубопровода в обоих направлениях

$$\Theta = \frac{2 \times 200}{1250} \int_0^{500} \frac{dX}{1 - 0,31X} = \frac{1}{1,15} \ln \frac{1}{1 - 0,31} \approx 1 \text{ сек.}$$

Трубопровод разбит на 3 участка таким образом, что время пробега волною крайних участков равно времени регулирования 0,2 сек, для чего имеем

$$\int_0^{l_1} \frac{dx}{a} = \int_{L-l_3}^L \frac{dx}{a} = 0,2,$$

откуда определяются $l_1, l_3, \Delta\lambda_1, \Delta\lambda_3$ ($\Delta\lambda = \frac{l}{L}$)

(см. таблицу ниже).

Расчетные величины для участков тр-да	I уч.	II уч.	III уч.	Примечание
Δt	0,232	0,593	0,175	$\Sigma \Delta t = 1$
по (43) и (32)	3,60	4,72	6,17	

Граничные уравнения имеют следующий вид:

1) сечение $X=0$ (у задвижки); в первой же фазе $\mu=0$; поэтому имеем

$$q=0; \bar{h} = \frac{r^*}{\varepsilon^*}; \quad s^* = -r^*;$$

2) Промежуточные сечения, условно принимаемые как сечения разрыва

$$q = \frac{\varepsilon_{i+1}^* s_i^* + \varepsilon_i^* r_{i+1}^*}{\varepsilon_i^* + \varepsilon_{i+1}^*} \quad h = \frac{r_{i+1}^* - s_i^*}{\varepsilon_i^* + \varepsilon_{i+1}^*}$$

$$r_i^* = q + \varepsilon_i^* h; \quad s_{i+1}^* = q - \varepsilon_{i+1}^* h;$$

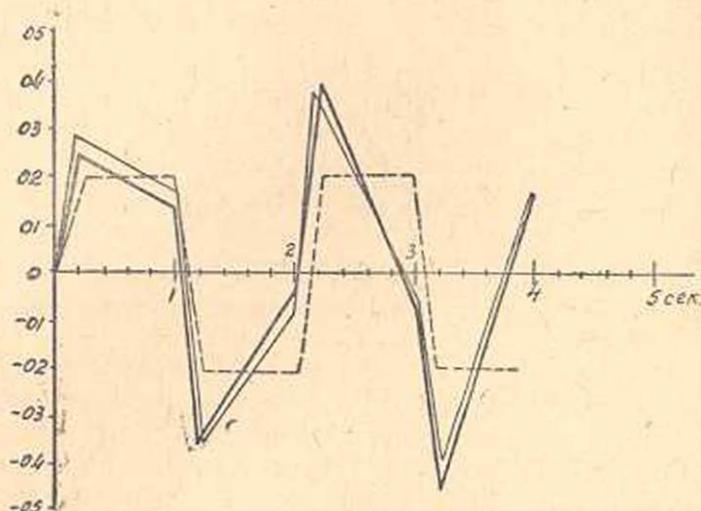
Индексами $i, i+1$ обозначены элементы, относящиеся к участку ниже и выше сечения, соответственно.

3) Сечение $X=1$ (у напорного бассейна):

$$q = s^*; \quad h = 0; \quad r^* = s^*;$$

Вычисленные значения s и r приведены на плане характеристик (фиг. 3). Значения h , в сопоставлении с данными Мелешенко, даны в нижеприведенной таблице и кроме того на фиг. 4 в виде графиков $h = \bar{h}(t)$.

Практически цифры совпадают; такое же совпадение имеет место между цифрами, полученными Мелещенко и данными Фавра.



- расчетные напоры (см. фиг. 3)
 — Напоры по Мелещенко (4 промежуточные точки)
 - - - Напор в осредненной трубе (без промежуточных точек на осц).

Фиг. 4

№ точек плана характеристик (см. фиг. 3)	Сечение у задвижки ($\lambda=0$)				Промежуточное сечение $x=l_1$ ($\lambda=0,232$)		Промежуточное сечение $x=l_1+l_2$ ($\lambda=0,825$)		Примечание
	Время в сек.	Относительные напоры по Мелещенко	Относительные напоры	Относительные расходы	Относительные напоры	Относительные расходы	Относительные напоры	Относительные расходы	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0,0	0	1	0	1	0,19	-0,16	Значения функций s^* и r^* см. на схеме (фиг. 3)
2	0,2	0,25	0,28	0	-0,08	-0,97	-0,17	0,5	
3	1,0	0,14	0,19	0	0,15	0,80	0,13	-0,75	
4	1,2	-0,36	-0,35	0	-0,20	-0,54	-0,08	0,85	
5	2,0	-0,03	-0,07	0					
6	2,2	0,42	0,37	0					
7	3,0	-0,08	-0,05	0					
8	3,2	-0,44	-0,39	0					
9	4,0	0,18	0,17	0					

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Favre—Revue Général de l'Hydraulique, №№ 19, 20, 21, 22, 23 и 24, 1938
2. Н. Т. Мелещенко—Изв. Научно-Исслед. Ин-та Гидротехники, № 29, 1941, стр. 5.
3. А. Н. Бровкович—Диссертация. Ленинградский Политехнический Институт, 1941.
4. К. Г. Асатур—Изв. АН Армянской ССР, т. III № 3, 1950.

Կ. Գ. ԱՍԱՏՈՒՐ

ՇԻԴՐԱՎԼԻԿ ՆԱՐՎԱԾԸ ԵՐԿԱՐՈՒՅՅԱՄԲ ԱՆԸՆԴՀԱՏՈՐԵՆ
ՓՈՒԿՈՒՍԿԻՍ ԲՐԱՍՏԱԳԾԻ ԵՎ ՊԱՐՈՒՆԱԿԻ ՀԱՍՏՈՒՅՅԱՄԲ
ԽՈՂՈՎԱՇԱՐՔԵՐՈՒՄ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Երկարությամբ անընդհատորեն փոփոխվող պարամետրներ ունեցող խողովակաշարքերի հաշվարկը ներկայացնում է մի խնդիր, որը չի լուծվում կլասիկական մեթոդներով:

Հեղինակն առաջարկում է հաշվարկի նոր, մոտավոր միջոց, որի հիմքում դրված է Ժուկովսկու ֆունկցիաների կիրառումը:

Հիմնական դիֆերենցիալ հավասարումն ընդունված է Բրովկովիչի դուրս բերված կանոնիկ ձևով:

Վճռման հավասարումներն իրենցից ներկայացնում են խարակտերիստիկները որոշող ինտեգրալ հավասարումներ, որոնց լուծումը արված է անհայտ ֆունկցիաները շարքի վերլուծելու միջոցով:

Շարքի վերցվող անդամների թիվը կախված է ճշտության աստիճանից, որը պահանջվում է հաշվարկից:

Հեղինակը տալիս է լուծման մի միջոց, որը թույլատրում է սահմանափակվել առաջին աստիճան ունեցող անդամներով:

Ստացված հավասարումներն ունեն նույն արտաքին տեսքը, ինչ որ Ժուկովսկու հավասարումները՝ հաստատուն պարամետրներ ունեցող խողովակի համար: Այդ հանգամանքը թույլ է տալիս հաշվարկում խողովակի պարամետրները հաստատուն համարել, օգտվելով և եղբայրան պայմաններն արտահայտող հավասարումներով, որոնք դուրս են բերված հաստատուն պարամետրներ ունեցող խողովակի համար: Հաշվարկում փոխարինող խողովակի պայմանաբար հաստատուն պարամետրի համար արվում է մի բանաձև, որը թույլ է տալիս որոշել այդ պարամետրը՝ ամեն ձև ունեցող խողովակի համար:

Օղեբացիաների տարբերությունը Ժուկովսկու մեթոդի հետ համեմատած կայանում է նրանում, որ այս դեպքում հնարավոր չէ կիրառել ստացված հավասարումները խառակտերիստիկների պլանի շերտի վրա $x=0$ սահմանից մինչև $x=L$ սահմանը՝ անընդհատորեն:

Ժուկովսկու ֆունկցիաները և նրանց ածանցյալների անընդհատության խախտումը սողնակի համապատասխան սահմանի վրա պայմանավորում է

խողովակաշարքի հաշվային մասերի համավաճումը, որտեղից հեռու մ է համապատասխան շերտերի լրացուցիչ բաժանումը:

Հեղինակի տված ինտեգրալ հավասարումներից իբրև մասնավոր դեպք ստացվում են սուրիշ հեղինակների առաջարկած հավասարումները:

Հոդվածում տված է հաշվարկի օրինակ: