

УДК 502/504:532.5

Л. Н. КАРТВЕЛИШВИЛИФедеральное государственное бюджетное научное учреждение
Центр научно-технической информации «Мелиоводинформ»**ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА:
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОПРОСОВ**

В статье говорится о некоторых специальных вопросах теории гидравлического удара: способах учета гидравлических сопротивлений по длине при его расчетах, экспериментальных исследованиях и др. Указываются экспериментальные и теоретические работы, в которых рассматриваются специальные вопросы.

Напорный трубопровод, течение жидкости, изменение давления, гидравлический удар, сопротивления по длине, экспериментальные исследования, специальные вопросы.

Certain special questions are discussed in the article concerning the theory of hydraulic impact: method of accounting hydraulic resistances along the length under its calculations, experimental researches etc. There are indicated experimental and theoretical works in which the special questions are considered.

Pressure pipeline, fluid flow, pressure change, hydraulic impact, resistance along length, experimental researches, special questions.

Гидравлический удар – резкое изменение давления в напорной трубе, вызванное большими локальными ускорениями жидкости, которое возникает практически во всех напорных трубопроводах. Его надо учитывать при расчетах прочности и надежности трубопроводных систем, при автоматическом управлении устройствами, присоединенными к трубопроводам. Гидравлическому удару посвящена очень большая литература. Данная работа затрагивает в основном лишь исследования специальных вопросов в теории гидравлического удара.

Способы учета гидравлических сопротивлений по длине.

Первые решения в этой области были получены в предположении, что гидравлические сопротивления по длине отсутствуют. Однако, например, когда длины трубопроводов значительны (водопроводные трубы, нефтепроводы), сопротивления необходимо учитывать.

Гидравлическим сопротивлениям в неустановившемся течении посвящено много работ, однако в связи с тем, что надежные результаты получены пока только для ламинарного режима [1], при расчетах гидравлического удара пользуются

гипотезой квазистационарности (считают, что сопротивления при неустановившемся режиме выражаются такими же зависимостями, как при установившемся), предложенной С. А. Христиановичем в 1938 году для анализа нестационарных течений в открытых руслах. В этом случае гидравлический уклон в уравнении движения

$$\frac{1}{g} \frac{du}{dt} + \frac{dy}{dx} + i = 0 \quad (1)$$

выражается зависимостью

$$i = \frac{\lambda u^2}{d 2g}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; u – средняя по сечению скорость потока; t – время; $y = z + p/(\rho g)$ – пьезометрический напор; z – отметка оси трубы в сечении с абсциссой x ; p – давление в этом сечении на оси; ρ – плотность жидкости, x – расстояние по оси трубы; i – гидравлический уклон; λ – коэффициент сопротивления.

Гипотеза квазистационарности дает хорошие результаты, если ускорения потока не превышают 7 м/с, как было установлено в процессе исследования [2].

Система уравнений

$$\frac{dy}{dt} + \frac{c^2}{g} \frac{du}{dx} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{1}{g} \frac{du}{dt} + \frac{dy}{dx} + i = 0 \quad (4)$$

становится при этом нелинейной. Она решается методом характеристик [3]. Например, уравнения Шнидера–Бержерона

$$\begin{aligned} y_{t+\frac{\mu}{2}}^M - y_t^N &= -\frac{c}{g}(u_{t+\frac{\mu}{2}}^M - u_t^N); \\ y_{t-\frac{\mu}{2}}^M - y_t^N &= \frac{c}{g}(u_{t-\frac{\mu}{2}}^M - u_t^N) \end{aligned} \quad (5)$$

являются интегралами уравнений характеристик для консервативного случая. Кроме того, система уравнений (3) и (4) решается методом явных и неявных разностных схем [4, 5].

Нелинейность зависимости гидравлического уклона от скорости (2) затрудняет решения любым методом. И. А. Чарный, приняв $i = \text{const}; u$, получил линейную систему уравнений и применил для ее решения метод контурных интегралов [6]. Он показал, что линейаризация сопротивлений даже при больших потерях напора не дает заметных погрешностей по сравнению с использованием выражения (2). В качестве основного граничного условия Чарный принимал заданный закон изменения расхода.

Линейаризация часто употребляется при расчетах и исследованиях гидравлического удара. Ее допустимость была подтверждена в работах [7, 8].

Таким образом, учет сопротивлений по длине при расчетах гидравлического удара обычно производят, используя гипотезу квазистационарности. Причем имеются данные, подтверждающие, что принятие линейной зависимости гидравлического уклона от средней скорости течения даже при больших сопротивлениях не дает заметных погрешностей по сравнению с использованием квадратичной зависимости (2).

Экспериментальные исследования, исследование специальных вопросов. Экспериментальные исследования гидравлического удара начали выполняться еще до работ Жуковского. Проверка в целом теории упругого гидравлического удара была сделана Жуковским [9]. Опыты показали, что если потери напора не превышают 20...25 % напора и учитываются в начальных условиях, т. е. динамический напор определяется суммированием гидравлического удара с пьезометрическим напором начального установившегося режима, рассчитанного с учетом сопротив-

лений (об учете сопротивлений в начальных условиях подробно говорится в [10]), то теория гидравлического удара в консервативных трубопроводах дает ошибку в определении абсолютного максимума изменения давления при ударе не более 2...3 %, а значит, удовлетворяет требованиям к точности инженерных расчетов. Последующие эксперименты, анализ которых был дан М. А. Мостковым в 1938 году, подтвердили этот вывод. Поэтому эксперименты с упругим ударом не дали поправок к теории.

В дальнейшем опыты были направлены в основном на изучение специальных вопросов: гидравлический удар в трубах из материалов с наследственными свойствами, например из полимеров; гидравлический удар при течении немонофазных жидкостей; гидравлический удар с разрывом сплошности потока; влияние гидравлического удара на режимы присоединенных к трубопроводам устройств (насосов, турбин) и др.

Целесообразно указать некоторые из экспериментальных и теоретических работ, в которых рассматриваются следующие специальные вопросы:

гидравлический удар в трубах из материалов с наследственными свойствами (материал трубы не подчиняется закону Гука), а также в пористых или перфорированных трубах [7, 8];

гидравлический удар с разрывом сплошности потока [11, 12];

гидравлический удар при течении немонофазных жидкостей [11, 13];

гидравлический удар в трубах некруговых сечений (многоугольных, прямоугольных, треугольных) [14];

гидравлический удар с учетом кольцевых структур в трубопроводной сети [15];

исследование влияния на протекание процесса гидравлического удара упругих волн, возникающих в стенках трубы [16].

Существуют также работы, посвященные физическому моделированию гидравлического удара (например, [17]), применению вариационных принципов к задачам, связанным с этим явлением, гидравлическому удару в коаксиальных (соосных) трубах. Нельзя не упомянуть и проблему защиты от гидравлического удара. Она в той или иной мере затрагивается,

например, в работах [11, 18].

Как уже отмечалось, гидравлическому удару посвящена большая литература. Известны такие авторы, как Л. Я. Айнола, М. М. Андрияшев, Н. В. Арефьев, В. А. Архангельский, К. Г. Асатур, В. В. Берлин, Ю. М. Блитштейн, В. А. Булатников, Б. Л. Буниатян, О. Ф. Васильев, Л. С. Геращенко, И. П. Гинзбург, М. Т. Гладышев, Б. Ф. Гликман, В. В. Грачев, А. А. Гриб, И. С. Громека, Р. Ф. Громова, М. А. Гусейнзаде, В. С. Дикаревский, Д. А. Догонадзе, А. Е. Жмудь, З. А. Зорян, А. Р. Каплан, Э. Г. Каск, Г. И. Кирмелашвили, В. Н. Коваленко, Ю. Ю. Ламп, Б. М. Левин, Е. Л. Левченко, Л. С. Лейбензон, У. Р. Лийв, Ю. В. Липовцев, М. В. Лурье, А. А. Маркин, И. М. Масляков, Л. И. Махарадзе, Н. Т. Мелещенко, Г. И. Мелконян, А. В. Мишуев, П. А. Мороз, А. А. Морозов, А. Ф. Мостовский, Л. Ф. Мошнин, В. М. Овсепян, В. И. Ольгаренко, Н. А. Панчурин, В. М. Папин, Л. В. Полянская, А. Я. Сагомоян, Б. А. Соколов, И. Б. Соколовский, А. А. Сурин, Е. Т. Тимофеева, В. А. Фартуков, Ф. Ф. Фогт, С. Я. Школьников, Е. И. Яковлев, А. В. Яскеляин; зарубежные авторы (далее зарубежье) Р. Ангус, И. Желев, Д. Людевиг, Е. Меиснер, Н. Николов, Д. Пармакин, Р. Петков, И. Пирсол, Г. Рич, П. Сьютер, Д. Хоффман и многие другие.

Выводы

Учет сопротивлений по длине при расчетах гидравлического удара обычно производят, используя гипотезу квазистационарности (т.е. считают, что сопротивления при неустановившемся режиме выражаются такими же зависимостями, как при установившемся), предложенную С. А. Христиановичем для анализа нестационарных течений в открытых руслах. При этом имеются данные, что принятие линейной зависимости гидравлического уклона от средней скорости течения даже при больших сопротивлениях не дает заметных погрешностей по сравнению с использованием квадратичной зависимости (2).

Экспериментальные исследования гидравлического удара начали выполняться еще до работ Жуковского. Опыты показали, что если потери напора не превышают 20...25 % напора и учитываются в начальных условиях, т. е. динамический напор определяется суммированием

гидравлического удара с пьезометрическим напором начального установившегося режима, рассчитанного с учетом сопротивлений, то теория гидравлического удара в консервативных (т. е. без учета потерь энергии) трубопроводах дает ошибку в определении абсолютного максимума изменения давления при ударе не более 2...3 %, а значит, удовлетворяет требованиям к точности инженерных расчетов. Поэтому эксперименты с упругим ударом не дали поправок к теории.

1. Попов Д. Н. Обобщенное уравнение для определения касательных напряжений трубы при неустановившемся движении вязкой жидкости // Известия вузов. Машиностроение. — 1967. — № 5. — С. 52–56.

2. Daily J. W., Hankey W. L., Olive R. W., Jordan J. M. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices // Transaction of the ASME. — 1956. — Vol. 78. — № 9. — P. 1071–1077.

3. Combes G., Zaoui J. Analyse des erreurs introduites par l' utilisation pratique de la m' ethode des caracteristique dans le calcul des coups de b' elier // La Houille Blanche. — 1967. — № 2. — P. 195–200.

4. Burnett R. R. Controlling transient surges when 5000 HP turbine drops off line // Pipe Line Industry. — 1960. — Vol. 12. — № 5. — P. 35–40.

5. Кублановский Л. Б., Муравьева Л. И. Применение метода конечных разностей по «неявной схеме» к решению задач неустановившегося движения жидкости в напорных трубопроводах // Нефтяное хозяйство. — 1970. — № 10. — С. 55–59.

6. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. — М.: Недра, 1975. — 296 с.

7. Картвелишвили Н. А. Динамика напорных трубопроводов. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.

8. Хубларян М. Г. Гидравлическая теория нестационарных потоков и некоторые ее приложения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МГМИ, 1975. — 33 с.

9. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах (полн. собр. соч.) — М. — Л.: Главная ред. авиац. лит-ры, 1937. — Т. 7. — С. 58–157.

10. Аронович Г. В., Картвелишвили Н. А., Любимцев Я. К. Гидравлический удар и уравнительные резервуары. – М.: Наука, 1968. – 247 с.

11. Альшев В. М. Неустановившееся напорное движение реальной жидкости в трубопроводных системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МГМИ, 1987. – 527 с.

12. Тарасевич В. В. О максимальном давлении при гидравлическом ударе, сопровождающемся разрывом сплошности потока // Гидротехническое строительство. – 1980. – № 8. – С. 15–18.

13. Рекомендации по расчету неустановившегося движения многофазной жидкости в напорных системах / Масс Е. И. [и др.] – М.: ВНИИ транспортного строительства, 1984. – 104 с.

14. Двухшерстов Г. И. Гидравлический удар в трубах некругового сечения и потоке жидкости между упругими стенками // Ученые записки МГУ. – 1948. – Т. 2. – С. 17–76.

15. Карамбиров С. Н. Совершенство-

вание методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многоуровневости и неполной исходной информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МГУП, 2005. – 46 с.

16. Szumovski A. Pressure wave pattern in a liquid filling an elastic pipe // Arch. Mech., Stosow. – 1978. – Vol. 30. – №№ 4 and 5. – P. 645–656.

17. Егиазаров И. В., Картвелишвили Н. А., Первозванский А. А. К влиянию резинового шланга с воздухом при моделировании гидравлического удара // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1957. – № 11. – С. 160–166.

18. Бегляров Д. С. Научное обоснование методов расчетов переходных процессов в напорных системах водоподачи с насосными станциями: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: МГУП, 2007. – 59 с.

Материал поступил в редакцию 15.08.12.

Картвелишвили Леонид Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник

E-mail: l_n_k@mail.ru

УДК 502/504:532.5

Л. Н. КАРТВЕЛИШВИЛИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Центр научно-технической информации «Мелиоводинформ»

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА И ИХ РАЗВИТИЕ

Дан краткий обзор современного состояния теории гидравлического удара. Отмечено, что для консервативных (без учета потерь энергии) трубопроводов теория разработана детально. Выделены направления, касающиеся того, какие выражения принимать за исходные при составлении расчетных алгоритмов.

Напорный трубопровод, гидравлический удар, скорость течения жидкости, потери энергии, система труб, граничные условия, принципы расчета, расчетные алгоритмы.

There is given a brief survey of the present state of the hydraulic impact theory. It is pointed out that for conservative (without consideration of energy losses) pipelines the theory is developed in detail. The directions are singled out concerning what expressions should be taken for the initial data when working out calculation algorithms.

Head pipeline, pressure pipeline, hydraulic impact, fluid flow velocity, losses of energy, system of pipes, boundary conditions, principles of calculation, calculated algorithms.