

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЧИСЛЕННЫМИ ПРИ НАРУШЕНИИ СПЛОШНОСТИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ

Ф.В. Рекач, Е.К. Синиченко

Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В статье описан расчет трубопровода с резервуаром и задвижкой, в котором происходит нарушение сплошности потока жидкости. Численный расчет сравнивается с экспериментальным.

Ключевые слова: разрыв сплошности потока, колебания.

Давление рабочей среды меняется по длине трубопровода во времени в результате неравномерного потребления и отбора, включения и выключения компрессорных и насосных агрегатов, перекрытия запорных устройств.

Генерация колебательных процессов в магистральных трубопроводах может происходить и по другим причинам: включения и выключения промежуточного отводящего трубопровода, автоматического ввода резервного насосного агрегата, перевода магистрального трубопровода с одного режима на другой. Аварийные ситуации в результате перечисленных возмущений могут быть обусловлены различными причинами: повышением давления выше предельно допустимого; понижением давления на входе в насосную станцию, сопровождаемым кавитационными процессами в насосных агрегатах; изменением направления потока, вызывающим закрытие обратных клапанов; большим начальным расходом при открытии задвижки на выходе из насоса, приводящим также к кавитации. Эти аварийные ситуации возможны уже в процессе распространения возмущения вдоль магистрального трубопровода, т.е. при нестационарном режиме работы.

Данные процессы могут приводить к значительному понижению давления в трубопроводе, особенно в точках с наибольшими абсолютными отметками оси трубопровода. Если давление становится ниже давления P_{\min}^* насыщенных паров, то жидкость закипает и возникает каверна. Она увеличивается до тех пор, пока давление на ее границах не увеличится до P_{\min}^* (если это происходит), после чего каверна уменьшается в объеме и исчезает.

Расчет производится численным методом характеристик, который подробно описан в [3].

Если в качестве основных характеристик потока принять расход $Q = F \cdot v$ и абсолютный гидродинамический напор, выраженный в метрах водяного столба, $H = p/(\rho g)$, то уравнения движения и неразрывности имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(gFz + gFH + \frac{Q^2}{2F} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda}{2DF} Q |Q| = 0 \quad (\text{м}^3/\text{сек}^2), \quad (1)$$

$$\frac{Q}{F} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gF} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{м/сек}), \quad (2)$$

где p — абсолютное гидродинамическое давление; v — средняя по живому сечению скорость; g — ускорение свободного падения; z — геометрическая высота; ρ — плотность жидкости; t — время; λ — коэффициент гидравлического трения по длине; D — диаметр трубопровода; c — скорость распространения волны давления; F — площадь поперечного сечения трубопровода.

Разрыв сплошности потока учитывается только в узлах сетки характеристик. В каждом m -ом узле гидравлической системы проверяется условие появления (или исчезновения) каверны.

При давлении $P_{m,j}$ в момент времени j большем P_{\min}^* в расчете не учитывается разрыв сплошности потока; при $P_{m,j} \leq P_{\min}^*$ возникает или развивается каверна, объем которой вычисляется по формуле

$$W_B = - \sum_{j=j_n}^{j=j_0} \Delta t \sum_{i=1}^{i=N} Q_{i,j}, \quad (3)$$

где j_n — момент времени начала разрыва сплошности колонн; j_0 — рассматриваемый момент времени; Δt — заданный шаг по времени; N — число ветвей трубопровода в узле; $Q_{i,j}$ — расход в каждой ветви трубопровода в момент времени j .

Знак – (минус) в (3) показывает, что средний расход в узле отрицательный за счет изменения объема (роста) каверны. Момент времени $j = j_k$, при котором происходит схлопывание колонн жидкости, определяется по знаку W_B . При $W_B > 0$ происходит формирование (увеличение или уменьшение) каверны, при $W_B \leq 0$ (момент времени j_k) целостность потока восстанавливается. Кривая $W_B = W_B(j)$ изображена на рис. 1.

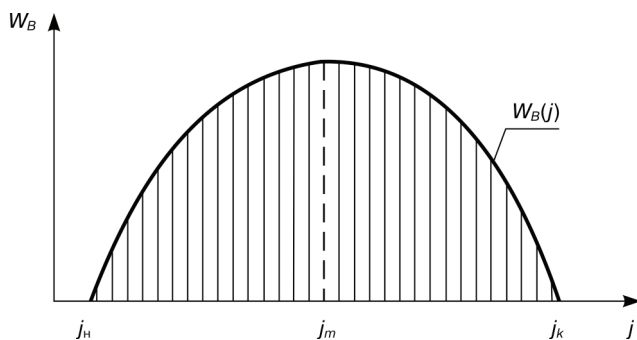


Рис. 1. Кривая $W_B = W_B(j)$

Теоретически $P_{\min}^* = P_{\text{н.п}}$ — давлению насыщенных паров; $P_{\text{н.п}} = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$ и вида жидкости. Наличие в жидкости (воде) растворенного воздуха увеличивает значение P_{\min}^* до $(1 - 2) \cdot 9,81$ кПА (или 0,1—0,2 атмосферы); $H_{\min}^* = \frac{P_{\min}^*}{\rho g} = 1 - 2$ м водяного столба.

При возникновении разрывов сплошности потока по длине трубопровода кавитационные каверны условно сосредотачиваются на границах расчетных участков или в специальных узлах (в узле закрытой задвижки, в узле насосного агрегата и т.д.).

Пример. Рассмотрим схему трубопровода, показанную на рис. 2. Экспериментальные данные взяты из [1]. Отметка поверхности резервуара по отношению к горизонтальному трубопроводу H_0 составляет 1,5 м, длина трубопровода $L = 16$ м, диаметр трубопровода 15 мм. Жидкость истекает из резервуара 1.

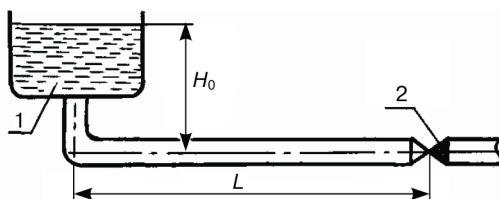


Рис. 2. Схема трубопровода

При установившемся режиме скорость движения воды составляет 0,77 м/с. Она подобрана таким образом, чтобы разрыв сплошности продолжался 6—7 фаз.

При этом результаты расчета и эксперимента должны иметь наибольшее отличие, так как погрешность численного расчета накапливается с увеличением числа пробегов волн. Специальный пробковый кран с пружинным приводом 2 закрывается почти мгновенно; $\tau_3 = 3—5$ м/с (в численном расчете время τ_3 принято равным нулю).

При проведении опытов были приняты специальные меры по удалению из труб воздуха, наличие которого искажает результаты.

На рисунке 3 сплошной линией показана экспериментальная кривая давления у задвижки, пунктирной — расчетная.

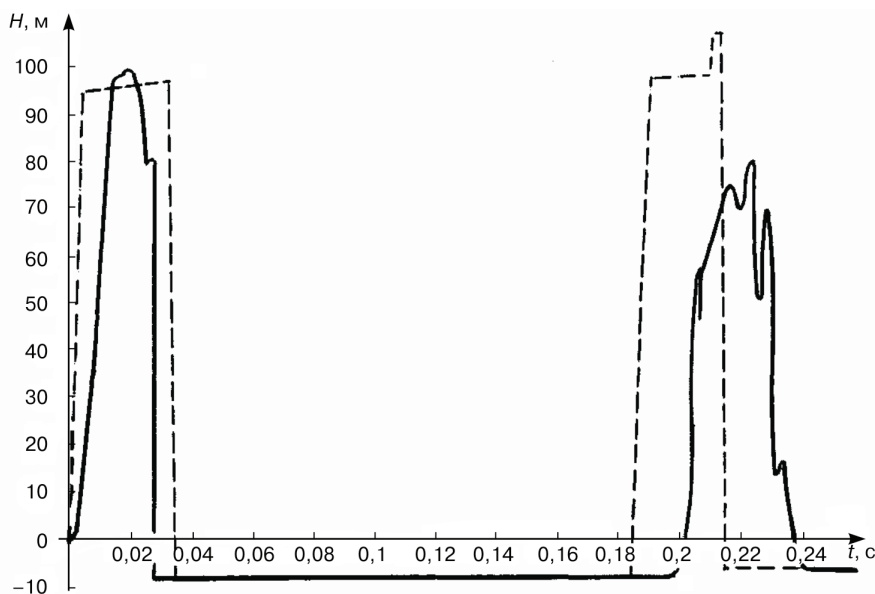


Рис. 3. Кривая давления у задвижки

Сравнение данных кривых показывает приемлемое совпадение. Следует отметить, что время развития каверны в численном расчете несколько меньше (до 10%), чем в эксперименте, а давление выше. Сдвиг по времени можно объяснить неточностью принятого вакуума, который в ходе эксперимента не остается постоянным. Завышенная величина давления, по-видимому, связана с тем, что трение рассчитывалось в квазистационарной постановке.

Численный метод реализован на языке C++ (Frog12PK), а графическое представление — в среде MAPLE (FrGFAF).

Достаточно хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом доказывает правильность математической модели расчета.

Сравнение численных результатов с [2] показывает, что модель нормально работает при небольших скоростях (до 1,0—1,5 м/с) и дает значительные расхождения при больших скоростях (выше 2,5—3 м/с).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Лямаев Б.Ф., Небольсин Г.П., Нелюбов В.А.* Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. — Л.: Машиностроение, 1978.
- [2] *Смирнов Д.Н., Зубов Л.Б.* Гидравлический удар в напорных водоводах. — М.: Стройиздат, 1975.
- [3] *Рекач Ф.В.* Расчет колебаний в круговых цилиндрических оболочках со стабилизатором давления методом характеристик // Строительная механика строительных конструкций и сооружений. — 2010. — № 1. — С. 60—65.
- [4] *Синиченко Е.К., Рекач Ф.В.* Определение частот свободных колебаний в трубопроводах с упругим элементом // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2010. — № 2.
- [5] *Рекач Ф.В., Синиченко Е.К.* Определение оптимальной площади отверстий перфорации в колпаке при гидроударе в напорных водоводах // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2010. — № 2.

PRESSURE OSCILLATIONS IN CIRCULAR CYLINDRICAL SHELLS UNDER CONTINUITY DISTURBANCE OF FLUID COLUMNS

F.V. Rekach, E.K. Sinichenko

Peoples' Friendship University of Russia
Ordshonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Analysis of a pipe — line with a reservoir and a gate valve under continuity disturbance of fluid columns is described in an article. Results are compared with experiments.

Key words: disturbance of fluid columns, pressure oscillations.