

## Динамика конструкций и сооружений

### КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ ПРИ РАЗРЫВЕ КОЛОНН ЖИДКОСТИ

Ф.В. РЕКАЧ, канд. техн. наук, доцент  
Российский университет дружбы народов,  
117198, Москва, ГСП – 6, ул. Миклухо-Маклая, 6

*В статье описан расчет трубопровода с резервуаром и задвижкой, в котором происходит разрыв колонн жидкости. Численный расчет сравнивается с экспериментом.*

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: включение и выключение промежуточного отводящего трубопровода, автоматический ввод резервного насосного агрегата, перевод 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, вызывающее 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 вышеописанные 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  $Q = Fv$  и абсолютный гидродинамический напор (выраженный в метрах водяного столба)  $H = p/(\rho g)$ , то уравнения движения и неразрывности имеют вид:

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

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

где  $p$  - абсолютное гидродинамическое давление;  $v$  - средняя по живому сечению скорость;  $g$  - ускорение свободного падения;  $z$  - геометрическая высота;  $\rho$  - плотность жидкости;  $t$  - время;  $\lambda$  - 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

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

где  $j_i$  - момент времени начала разрыва сплошности колонн,  $j_0$  - рассматриваемый момент времени,  $\Delta t$  - 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. Теоретически  $P_{\min}^* = P_{i.f.}$  - давлению насыщенных паров;  $P_{i.f.} = f(t^0 C)$  и вида жидкости. Наличие в жидкости (воде) растворенного воздуха увеличивает значение  $P_{\min}^*$  до  $(1-2) \cdot 9.81 \text{ кПа}$  (или 0.1-0.2 атмосферы);

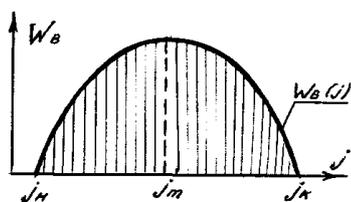


Рис. 1

$H_{\min}^* = P_{\min}^* / (\rho g) = 1 - 2 \text{ м}$  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  $L = 16 \text{ м}$ , диаметр трубопровода 15 мм. Жидкость истекает из резервуара 1. При установившемся режиме скорость движения воды составляет  $0.77 \text{ м/с}$ . 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;  $\tau_3 = 3 - 5 \text{ мс}$ . (В численном расчете время  $\tau_3$  принято равным нулю).

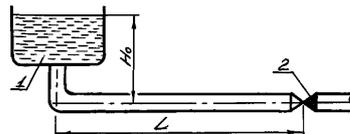


Рис. 2

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

На рис. 3 сплошной линией показана экспериментальная кривая давления у задвижки, пунктирной – расчетная.

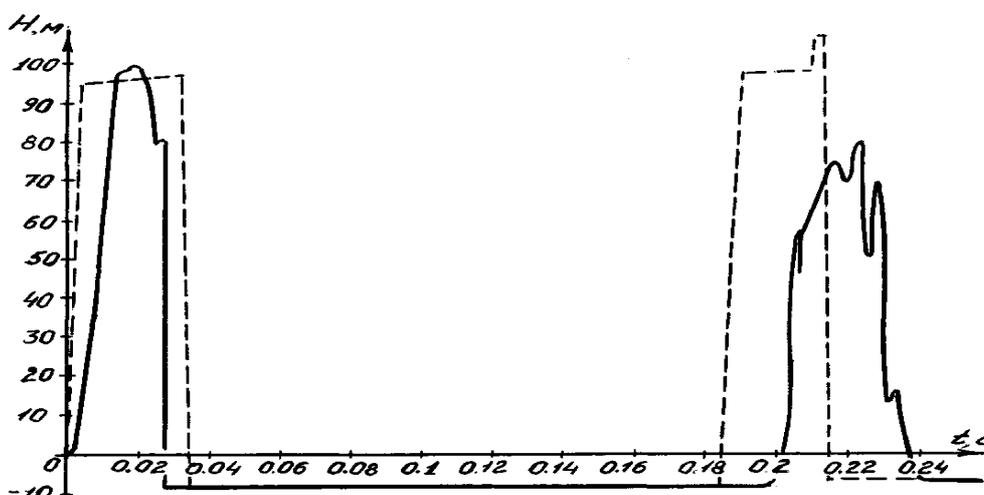


Рис.3

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).

Выводы:

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

2) 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).

Л и т е р а т у р а

1. Лямаев Б.Ф., Небольсин Г.П., Нелюбов В.А. Стационарные и переходные процессы в сложных гидросистемах. // Л., Машиностроение, 1978 – 191 с.
2. Смирнов Д.Н., Зубов Л.Б. Гидравлический удар в напорных водоводах. // М., Стройиздат, 1975 – 125 с.
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.

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

F.V. Rekach

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