

УДК 621.593:681.5

А.В. Королёв, д-р техн. наук,

П.П. Червоненко

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

Аннотация. Представлено моделирование технологического трубопровода методом электрических аналогий. Проведен численный эксперимент. Результаты расчета качественно совпадают с поведением двухфазного потока в реальных трубопроводных системах.

Ключевые слова: электрические аналогии, двухфазный поток, неустойчивость, трубопроводные системы.

A.V. Korolyov, DSc,

P.P. Chervonenko

RESEARCH OF SYSTEM INSTABILITY OF ADJUSTING OF LEVEL METHODS OF DYNAMIC ANALOGIES

Abstract. The design of technological pipeline by the method of electric analogies is presented. A numeral experiment is conducted. The results of calculation high-quality coincide with the conduct of two-phase flow in the real pipeline systems

Keywords: electric analogies, two-phase flow, instability, pipeline systems.

A.V. Korolyov, д-р техн. наук,

П.П. Червоненко

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМОЇ НЕСТІЙКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ МЕТОДАМИ ДИНАМІЧНИХ АНАЛОГІЙ

Анотація. Представлено моделювання технологічного трубопроводу методом електричних аналогій. Проведено чисельний експеримент. Результати розрахунку якісно збігаються з поведінкою двофазного потоку в реальних трубопроводних системах.

Ключові слова: електричні аналогії, двофазний потік, нестійкість, трубопроводні системи.

Введение. Одна из проблем эксплуатации технологических систем, оборудованных регуляторами уровня (рис 1), является появление системной неустойчивости, приводящей к значительному уменьшению ресурса арматуры и трубопроводов. Устранение этих режимов требует глубокого понимания происходящих в них процессов. Эксплуатация подобных систем с двухфазными средами сопровождается сложными теплогидравлическими процессами и представляет существенную сложность при их аналитическом описании. Например, в работе [3] математические модели двухфазных сред представлены дифференциальными уравнениями, не имеющими аналитических решений. Поэтому в 1980-х годах – для решения задач, в том числе атомной энергетики, появились работы с упрощенными моделями двухфазных потоков, например [5]. В работе [1] было доказана возможность перехода с пароводяных потоков на воздушно-водяные при выполнении экспериментальных исследований, позволившее их существенно упростить.

Это оказалось возможным благодаря открытию свойству двухфазных сред взаимодействовать не на уровне молекул (как в воде или газе), а на уровне дискретных газожидкостных структур, составляющих этот поток [2]. При этом модели двухфазных потоков, с определенными допущениями, успешно заменялись механическими моделями. Подобная замена позволила, в частности, объяснить специфику движения двухфазного потока в снарядно-пробковом режиме, а также причины понижения скорости звука в таких системах до крайне низких значений (14–20 м/с) [2].

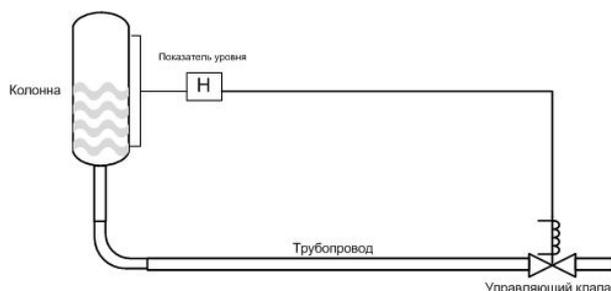


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования уровня

Моделирование системной неустойчивости регулирования уровня в сосудах ВРУ с кипящей жидкостью выполнялось методами

динамических аналогий [4] в среде Matlab (Simulink). При этом в качестве элементарных звеньев выбирались RLC – цепочки [6]. Входными данными для расчета отдельных элементов RLC являлись: длина трубопровода, диаметр, давление, плотность.

Расчет элементов велся по формулам:

а) аналогия электрического сопротивления (1) и акустического сопротивления (2)

$$r_E = \frac{e}{i}, \quad (1)$$

где e – напряжение (В), i – сила тока (А)

$$r_A = \frac{P}{U}, \quad (2)$$

где P – давление (Па), U – расход среды (i^3/\tilde{n});

б) аналогия электрической индуктивности (3) и акустической инертности (4):

$$e = L \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

где e – электродвижущая сила (В), di/dt – изменение тока (А/с)

$$p = M \frac{dU}{dt}, \quad (4)$$

где M – инертность ($e\tilde{a}/i^4$), dU/dt – изменение тока в среде (i^3/\tilde{n}^2), p – давление (Па);

в) аналогия электрической емкости (5) и акустической емкости (6):

$$e = \frac{1}{C_E} \int idt = \frac{q}{C_E}, \quad (5)$$

где q – заряд электрической емкости (кулон), e – электродвижущая сила (вольт)

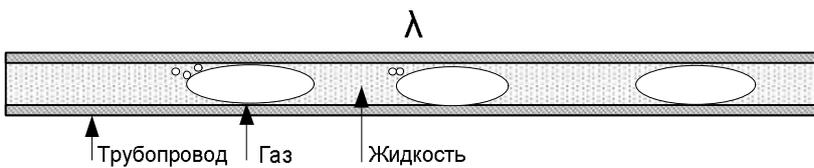
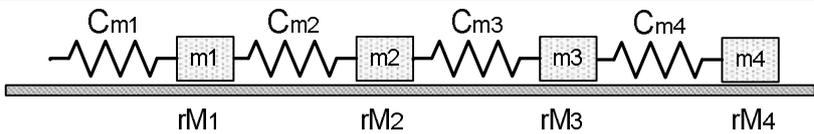
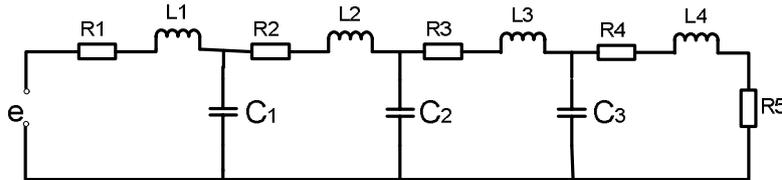
$$C_A = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (6)$$

где c – скорость (i/\tilde{n}), ρ – плотность ($e\tilde{a}/i^3$), V – объем (i^3).

Соответствие динамических аналогий при переходе от гидравлической схемы описания к электрической представлено в табл. 1.

Ниже представлены результаты численного моделирования электрической аналогии трубопроводов на рис 2. Получаемые на электрической модели колебания напряжений сравнивались с результатами, ранее полученными при моделировании двухфазного потока на стенде. Такое сравнение позволило качественно оценить адекватность использования электрических аналогий для моделирования двухфазных течений.

1. Динамические аналогии

Схема	Структура процесса
Гидравлическая	 <p>Трубопровод Газ Жидкость</p>
Механическая	 <p>C_{m1} $m1$ C_{m2} $m2$ C_{m3} $m3$ C_{m4} $m4$ $rM1$ $rM2$ $rM3$ $rM4$</p>
Электрическая	 <p>$R1$ $L1$ $R2$ $L2$ $R3$ $L3$ $R4$ $L4$ $C1$ $C2$ $C3$ $R5$</p>

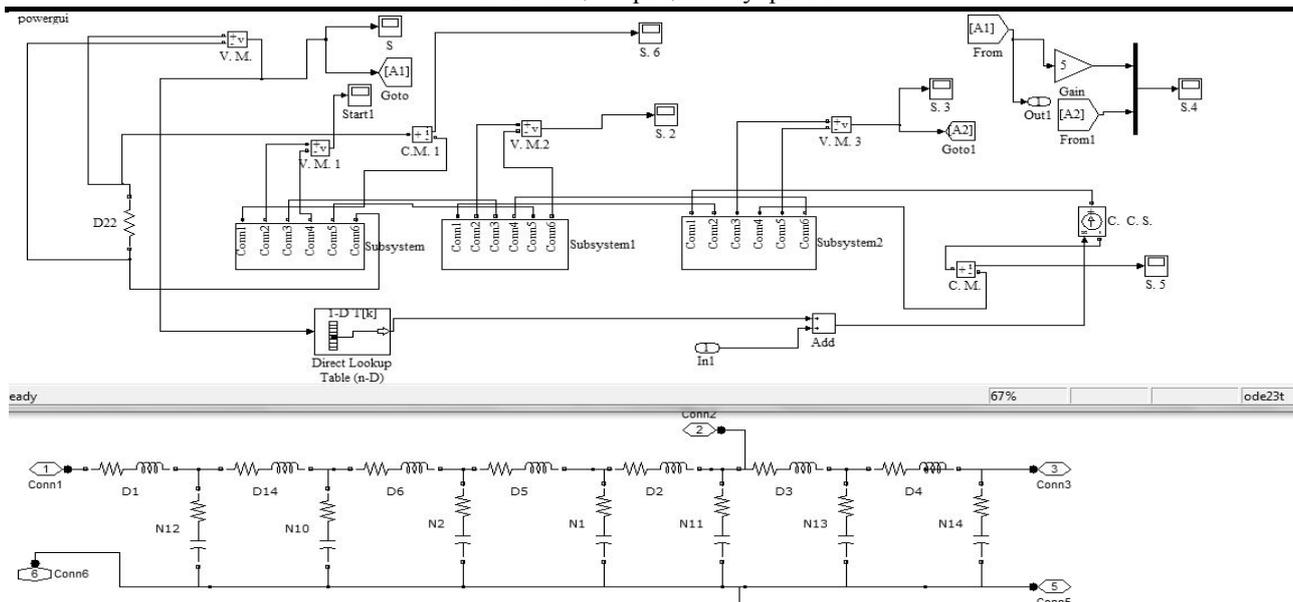


Рис. 2. Электрическая аналогия трубопровода с двухфазным потоком

Для моделирования технологического трубопровода RLC звенья выстраивались в цепочку (рис. 2.). В начале электрической схемы, реализующей аналогию трубопровода (рис. 2), включался резистор, имитирующий акустическую развязку трубопровода (ёмкость). В конце модели трубопровода поставлен регулятор в виде источника тока с задаваемой таблицей значений положения регулятора. График, построенный по таблице значений на рис. 3. Такой вид графика связан с запаздыванием прохождения технологического сигнала по давлению (обратная связь) по отношению к сигналу управления и отображает реальное поведение регулирующего органа (клапана) при возникновении неустойчивости.

Для лучшего приближения модели к реальному оборудованию был проведен расчёт элементов RLC, составляющих элементарный осциллятор. Сигнал обратной связи задавался напряжением, снимаемым с резистора в начале цепи и подаваемом на источник тока, имитирующий степень открытия клапана.

Проведенные расчёты показали, что поведение двухфазного потока в снарядно-пробковом режиме течения подобно характеру колебаний напряжения на электрической модели (рис. 4). Напряжение на всех участках цепи пульсирует, уменьшаясь по амплитуде от выхода на вход. Подобное за-

тухание колебаний давлений наблюдалось и в реальных трубопроводах, и было связано с сильной диссипацией звуковой энергии в двухфазной среде (рис. 4,а). При наблюдении в электрической цепи модели эти структуры представляли нелинейные колебания напряжения (рис. 4,б).

На рис. 5, а показано затухание колебаний давления, распространяющегося с выхода трубопровода на его вход [2], на рис 5,б – затухание колебаний напряжений в электрической модели трубопровода (рис. 2). Затухания в обоих случаях описываются показательными функциями, отличающимися декрементом затухания и степенью успокоения.

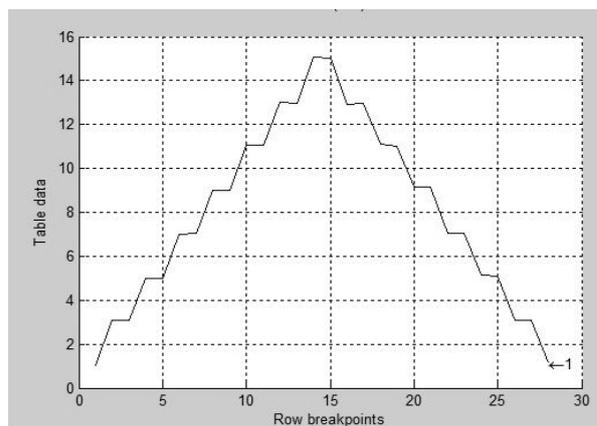


Рис. 3. Моделирование работы регулирующего органа в режиме неустойчивого слежения за уровнем

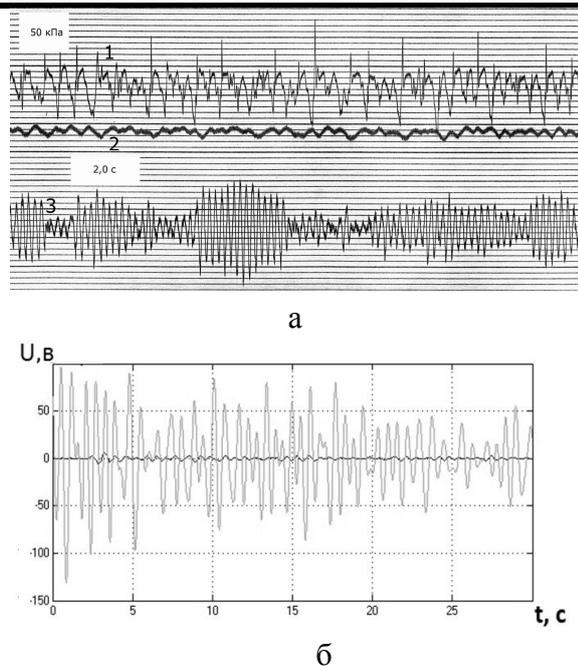


Рис. 4. Осциллограмма колебаний давления в трубопроводе с двухфазным потоком (а) и пульсация напряжения на его электрической аналогии (б)

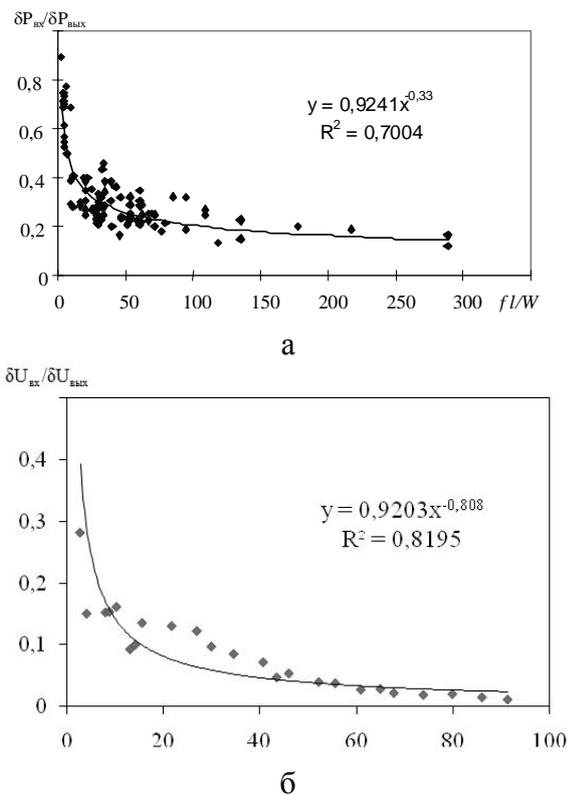


Рис. 5. Зависимость степени затухания колебаний давления от относительной частоты колебательного процесса в двухфазном потоке (а) и в его электрической аналогии (б)

Сравнение двух аналогий (электрической и гидравлической) выполнялось так же через сравнения коэффициентов затухания используемых при моделировании схемы (рис. 2). Для двухфазного потока $d = -0,33, \delta_p = -0,33$, а для модели $d = -1,16, \delta_U = -0,808$. Различия в полученных значениях могут быть обусловлены тем, что в реальных системах при прохождении двухфазного потока со случайной структурой (размеры элементарных осцилляторов различны) с выхода на вход трубопровода идут колебания более широкого спектра в отличие от электрических колебаний в модели.

Выводы

1. При разных степенях открытия регулируемой арматуры (рис. 3) в модели реализуется неустойчивость, проявляющаяся в виде нелинейных колебаний давления. Это приводит к частой отработке регулирующего клапана и быстрой потере его ресурса.

2. Сравнительный анализ характеристик двухфазного потока, таких, например, как степень затухания сигнала, с подобными характеристиками модели, показал её высокую адекватность для моделирования реальных гидравлических систем.

3. Появление колебаний давления возможно и в линейных системах при наличии значительного запаздывания технологического сигнала.

Список использованной литературы

1. Королёв А.В. Вибрации дренажных трубопроводов АЭС и пути их снижения. – Арх. Соис. канд. техн. наук: Ядерн. энерг. установки. – Ленинград: НПО ЦКТИ. –1989. – 245 с.
2. Королёв А.В. Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями / А.В. Королёв, М.В. Максимов. – Одесса: Астропринт, 2010. – 456 с.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464 с.
4. Ольсон Г. Динамически аналогии / Г. Ольсон. – М.: Изд-во. ИЛ. – 1947. – С.102–104.

5. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки / В.В. Фисенко – М.: Атомиздат, 1978. – 160 с.

6. Koenig H.E., Blackwell W.A. *Electromechanical System Theory*. – New York: McGraw-Hill. – 1961. – P.26–38.

Получено 10.02.2012

References

1. Korolyov A.V. to Vibration of drainage pipelines and way of their decline AES. – Leningrad: NPO OF CKTI, 1989. – 245 p. [Russian].

2. Korolyov A.V., Maksimov M.V. Analysis and design of teploenergeticheskogo equipment, working with diphasic flows. – Odessa: Astroprint, 2010. – 456 p. [Ukrainian].

3. Nigmatulin R.I. Dynamics of mnogo-faznykh environments of. – Moscow: Science, 1987. – Ch.1. – 464 p. [Russian].

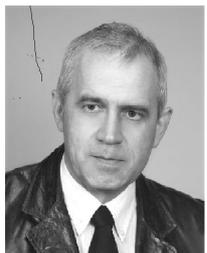
4. Olson G. Dinamicheski analogies – Moscow: Izd-vo. I. L. – 1947. P.102–104 [Russian].

5. Fisenko V.V. The Critical diphasic streams. – Moscow: Atomizdat, 1978. – 160 p. [Russian].

6. Koenig H.E., Blackwell W.A. *Electromechanical System Theory*. – New York: McGraw-Hill. – 1961. – P. 26–38 [in English].



Червоненко
Петр Петрович,
ст.преп. каф. информационных систем Одесского нац. политехн. ун-та,
e-mail:
ppche vonenko@ukr.net ,
тел. 0663346815



Королёв
Александр Викторович,
д-р техн. наук, проф. каф.
АЭС Одесского нац. политехн. ун-та,
e-mail: korol118@ukr.net,
тел. 0672840079