

аппаратов. – М. : Машиностроение, 1989. – 216 с.

11. **Чутов Ю. И., Кравченко А. Ю.** Влияние дополнительного охлаждения и нагрева электронов на разлет плазменных сгустков в вакуум // Физика плазмы. – 1983. – 9, № 3. – С. 655 – 658.

12. **Шувалов В. А.** Приближенные модели истечения сверхзвуковой струи газа в вакуум / В. А. Шувалов, О. А. Левкович, Г. С. Кочубей // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – 42, № 2. – С. 62 – 67.

УДК 622.4:532.595.2

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ф. А. Корсун, к. т. н., асист.

Ключевые слова: охлажденная вода, отепленная вода, неустановившееся движение жидкости, установившееся движение жидкости, гидравлический удар, процессы, давление

Введение. Многие физические явления, между которыми на первый взгляд нет ничего общего, подчиняются одним и тем же математическим законам.

Так, неустановившееся движение жидкости в трубопроводе и распространение тока вдоль электрической линии (как, впрочем, и переходные процессы в ряде других областей физики и техники) описываются уравнениями гиперболического типа. Это обстоятельство позволяет использовать результаты, полученные в одной области, для изучения и расчета процессов в другой.

Анализ публикаций. Наиболее дешевыми и удобными для исследования являются электрические модели. Такая модель была применена автором для изучения гидравлических ударов в шахтной гидравлической системе кондиционирования рудничного воздуха.

Альтернативой метода электрического моделирования принято считать математическое моделирование, т. е. решение поставленной задачи каким-либо численно-аналитическим методом.

Это не совсем верно, ибо математическое моделирование правомерно, когда верны исходные уравнения, описывающие изучаемый процесс. Последние должны выводиться не только умозрительно, но и на основе натурального, в частности, гидравлического эксперимента.

Другие авторы под термином «математическое моделирование» понимают более широкий круг действий:

- анализ изучаемого явления или работы технического устройства;
- выделение главных факторов, влияющих на процесс, и отбрасывание второстепенных – для упрощения исследования;
- построение физической модели;
- математическое описание этой модели;
- решение уравнений, описывающих процесс;
- сравнение решения с результатами исследования на физической модели и с натурой;
- корректировка математических уравнений и т. д. до получения удовлетворительного результата.

Однако их может восполнить также электрическая модель изучаемого процесса или устройства.

Поэтому уместно сравнивать электрическое моделирование как с численно-аналитическим расчетом, так и с гидравлическим экспериментом. При сравнении будем обращаться к конкретному примеру.

Изучалась работа гидравлической системы, представленной на рисунке 1. Охлажденная вода подается по вертикальному трубопроводу 3 на глубину 1 000 м и через гидрораспределитель 5 – на подземный горизонт, а отепленная – по обратному трубопроводу 4 наверх, при этом поток воды в месте сопряжения трубопроводов 3 и 4 периодически прерывается, в системе возникает гидравлический удар.

Задача исследования – определить параметры этого процесса, т. е. изменения давления и скорости жидкости во времени вдоль трубопроводов, и возможности уменьшения амплитуд

колебаний давления и время переходного процесса, а также потери энергии, вызванные этими колебаниями.

Материалы и методы. Электрическая модель этой системы, выполненная в соответствии с рекомендациями работы [1], представлена на рисунках 2, 3. Модель была собрана из имеющихся в продаже стандартных элементов: резисторов, индуктивностей, емкостей гальванических элементов, стабилизированных источников питания и др. Возможности ее были ограничены параметрами этих элементов и в принципе могут быть существенно расширены при применении специально изготовленных комплектующих.

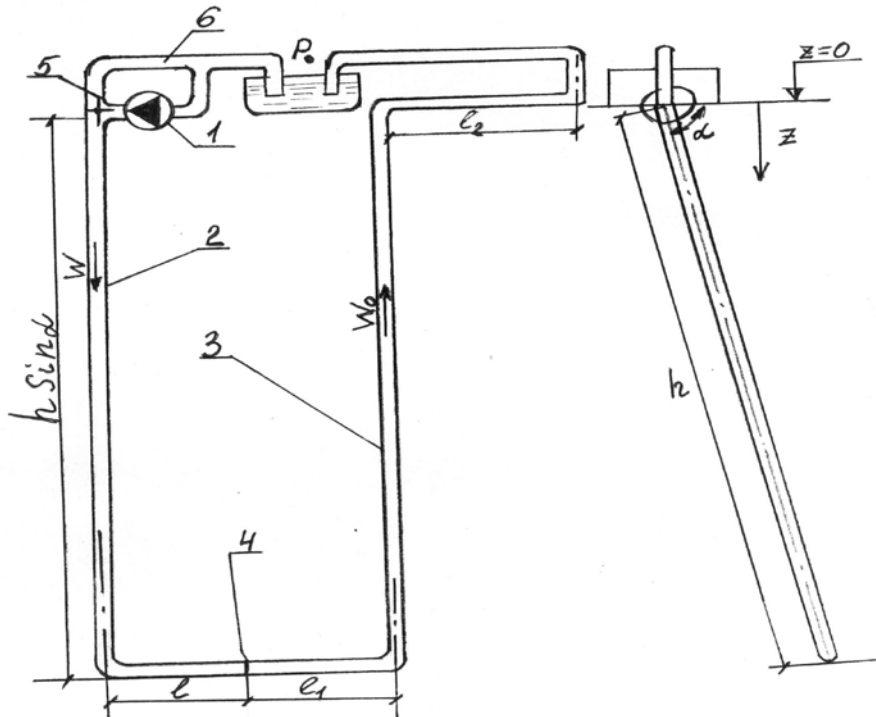


Рис. 1. Гидравлическая схема ПСРХ СКРВ шахт, которая рассчитывается: 1 – насос; 2,3 – напорный и обратный трубопроводы; 4 – задвижка (гидрораспределитель); 5 – обратный клапан; 6 – обводная линия

Сравнение метода электрического моделирования с численно-аналитическим методом расчета.

Требования к квалификации исполнителя:

- исполнитель должен хорошо знать свою область и систему аналогий между параметрами природы и модели;
- исполнитель должен иметь основательную подготовку в специальных разделах математики, что зачастую приводит к необходимости совместной работы специалиста по технике и математика.

Возможность принципиальных ошибок:

- наглядность метода исключает грубые логические ошибки;
- перевод технической задачи на язык математических условий, которые зачастую необходимо искусственно преобразовать к виду, допускающему решения выбранным методом, к принципиальным ошибкам, связанным с глубоким абстрагированием.

Так, при решении поставленной задачи методом электрического моделирования установлено:

- картина гидроудара как для горизонтального, так и для вертикального (или наклонного) трубопровода не зависит от величины давления в системе. Это обстоятельство позволяет изучить гидравлический удар с большой амплитудой колебания давления без кавитации, поддерживая в замкнутой системе давление, превосходящее по модулю бросок давления в отрицательной полуволне;

- наличие градиента гидравлического давления вдоль трубопровода существенно влияет на картину и параметры гидроудара, т. е. удары в горизонтальном и вертикальном трубопроводах будут сильно отличаться, и это отличие тем больше, чем больше глубина трубопровода.

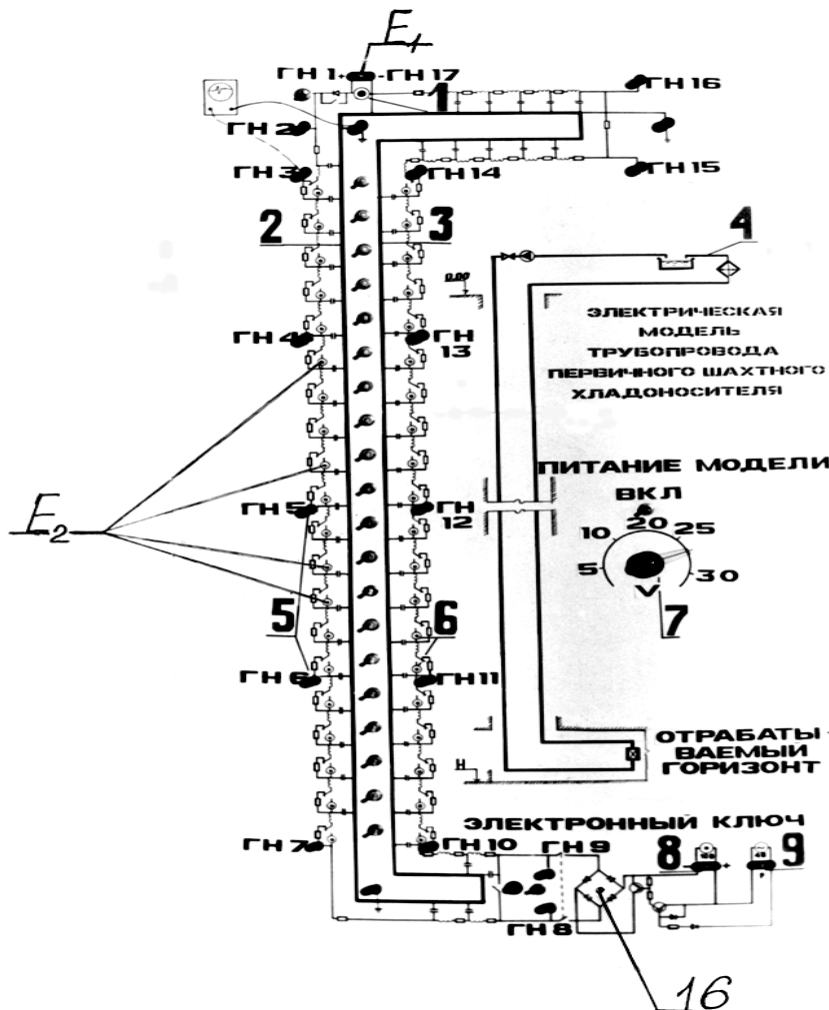


Рис. 2. Электрическая модель первого контура хладонносителя: 1 – индикация включения питания модели (насос); 2 – подающий трубопровод; 3 – обратный трубопровод; 4 – гидравлическая схема трубопровода; 5 – контрольные гнезда ГН 1-ГН 17; 6 – индикация и тумблеры включения батарей питания; 7 – регулятор напряжения питания модели; 8 – гнезда контроля питания электронного ключа; 9 – гнезда подключения генератора звуковой частоты; 16 – электронный ключ; E1 – источник питания модели; E2 – источник постоянного тока, имитирующий столб жидкости

Достоверные количественные соотношения не были установлены из-за ограниченности параметров модели, однако этот вопрос связан только с необходимостью изготовления более совершенной модели.

При решении той же задачи на ЭВМ методом характеристик оба вывода были подтверждены и количественные соотношения для вертикального трубопровода были получены.

Трудоёмкость и стоимость исследования:

- стоимость комплектующих модели (в которые входят три варианта номиналов резисторов, конденсаторов и емкостей для элементарных участков модели, а также элементы, позволяющие исследовать влияние внешних факторов на процесс гидроудара) составила 400 грн.

Время изготовления модели – 1 месяц работы высококвалифицированного радиоинженера.

Регистрация параметров процесса проводилась вручную – путем записи значений напряжений и времени с осциллограмм с последующим пересчетом этих значений на натурные параметры.

Процедура исследования одного варианта параметров системы, то есть процесс измерений в 15...17 точках модели, занимает 1,5 – 2 часа. В принципе эта процедура может быть существенно усовершенствована.

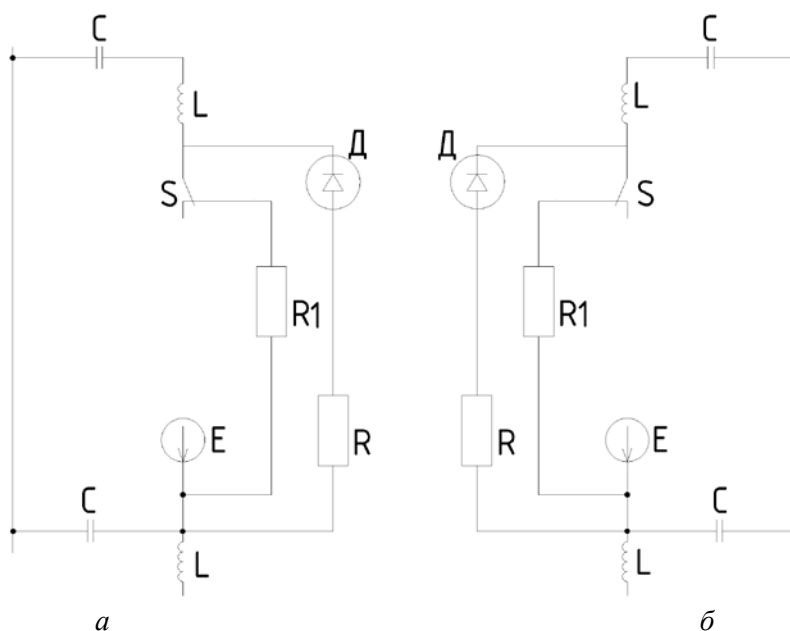


Рис. 3. Схема электрических ячеек, имитирующих давление элементарного столба жидкости: а – ячейка восходящей ветви трубопровода; б – ячейка нисходящей ветви трубопровода; С – конденсатор 360 нФ; L – индикатор (катушка индуктивности) – 30 мкГн; R1 – резистор – 0,5 Ом; R – резистор 330 Ом; E – источник постоянного тока; D – светодиод; S – электронный ключ; 2 – нисходящая шина модели; 3 – восходящая шина модели

- подготовка задачи к решению методом характеристик, программирование и отладка программы – 2 месяца работы высококвалифицированного математика.

Результаты расчета могут быть представлены в табличной форме или в виде графиков зависимости давления и скорости жидкости от времени в любой точке трубопровода. Время получения одного графика 3 – 4 минуты. Для исследования одного варианта параметров системы достаточно получить графики давлений и скорости в 6 – 8 точках по длине прямого и обратного трубопроводов, что занимает $4 \times 8 \times 2 = 64$ минуты. На самом деле это время несколько больше (примерно 2,5 – 3 часа), так как переход от точки к точке требует дополнительного обращения к ЭВМ.

Наглядность результатов. Осциллограммы давления или скорости в любой точке модели предельно наглядны и легко поддаются анализу.

Результаты расчета, представленные в виде графиков, так же наглядны, как и осциллограммы.

Точность. В настоящей работе погрешности моделирования и точность полученных результатов не оценивались. В работе [2], посвященной решению аналогичной нестационарной гидравлической задачи методом электрического моделирования, по оценкам автора погрешности составляли $\pm 7,5\%$.

Метод электрического моделирования широко применяется для решения уравнений эллиптического типа, для чего были разработаны разнообразные моделирующие устройства: электролитические ванны, сеточные интеграторы и др.

Наиболее удачливыми можно считать промышленно изготовлявшиеся интеграторы ЭГДА 9/60 [3], в которых в качестве приводящей среды использовалась электропроводная бумага. Погрешность решения задач с их помощью не превышала $\pm 5\%$ и могла быть доведена до $0,5\%$. Можно ожидать, что при тщательной разработке моделей для решения уравнений гиперболического типа (телеграфных уравнений) может быть получена не меньшая точность.

С помощью современных ЭВМ может быть достигнута любая точность решения, намного превосходящая точность исходных данных.

Возможность переноса решений из одной области техники в другую. Наглядность электрической модели позволяет легко переносить решения из хорошо разработанных в электротехнике и радиотехнике в исследуемую область.

Процедура решения задачи численно-аналитическим методом не располагает к анализу достижений в других областях техники, получаемых при решении аналогичных задач. Как правило, математикам эти достижения не известны. Их исследование в принципе возможно при специальном изучении смежных областей.

Так, при решении поставленной задачи возник вопрос об использовании энергии жидкости в момент срабатывания запорного устройства. Из электротехники известно, что передача энергии от генератора к нагрузке происходит наиболее эффективно, когда внутреннее сопротивление генератора равно волновому сопротивлению линии электропередачи и активному сопротивлению нагрузки.

Рассматривая трубопровод в момент его перекрытия как генератор (энергии и в то же время как линию передачи энергии, обладающую определенным волновым сопротивлением), попробуем для поглощения энергии удара подключить к этой линии активную полезную нагрузку, которая должна располагаться параллельно запорному устройству. Это предложение было проверено и подтверждено на электрической модели трубопровода, где параллельно электронному ключу могло подключаться регулируемое активное сопротивление $R_{\text{созл}}$ (согласованная с параметрами трубопровода нагрузка).

Сравнение метода электрического моделирования с гидравлическим экспериментом и полномасштабной гидравлической системой

Информативность:

На электрической модели можно легко варьировать следующие параметры:

- скорость жидкости;
- глубину и угол наклона трубопровода;
- время срабатывания запорного устройства (задвижки, клапана);
- потери на трение вдоль трубопровода;
- волновое сопротивление трубопровода.

Нельзя моделировать кавитацию.

Есть трудности при моделировании гидроудара в наклонном трубопроводе, когда удар начинается с понижения давления (то есть когда направление скорости жидкости до момента возмущения противоположно направлению силы тяжести).

На гидравлической модели можно варьировать скорость жидкости и время срабатывания запорного устройства. Для изменения других параметров надо по существу собирать другую модель.

Можно изучать гидроудары, начинающиеся как с повышения, так и с понижения давления без кавитации и с кавитацией.

Полномасштабная система содержит все реальные условия, но их взаимовлияние трудно анализировать.

Стоимость и время изготовления:

- электрическая модель для решения ближайшей задачи – изучение гидроудара при наличии градиента гидравлического давления вдоль трубопровода – будет стоить примерно 4 800 грн (комплектующие и изготовление без учета накладных расходов). Время ее изготовления 1,5 – 2 месяца;

- гидравлическая модель исследуемой системы высотой не менее 30 – 40 м, предназначенная для той же цели, ориентировочно может стоить 24 000 грн и быть выполнена за несколько месяцев;

- оценка не проводилась.

Выводы. Из изложенного ясно: приведенные методы исследования переходных процессов в гидравлике следует рассматривать не как альтернативные, а как взаимодополняющие. При этом возможности метода электрического моделирования могут быть существенно расширены, если специально разработать элементы, воспроизводящие те или иные гидравлические явления, для которых в настоящее время нет электрических аналогов. Приведем перечень нерешенных вопросов.

1. Резисторы, величина сопротивления которых пропорциональна протекающему через них току. Наличие таких резисторов позволит не прибегать к линеаризации уравнений гидравлики и иметь на модели одинаковые константы подобия для установившегося и переходного процессов.

2. Разработка источников напряжения, допускающих протекание через них тока в прямом и обратном направлениях и обладающих весьма малым внутренним сопротивлением, что позволит моделировать градиент гидростатического давления при любом направлении скорости жидкости в трубопроводе.

3. Разработка конденсаторов, допускающих в прямой полуволне зарядку до любого положительного напряжения, а в обратной – до ограниченного (небольшого по модулю) отрицательного напряжения. Наличие таких конденсаторов обеспечит возможность моделирования кавитации.

4. Электронный ключ, время срабатывания которого может варьироваться от 3 – 40 мкс, а сопротивление за этот период нарастать от нуля до бесконечности по заданному закону.

5. Возможность удобного варьирования параметров погонных элементов модели: сопротивления, резисторов, емкости конденсаторов, индуктивности, дросселей, напряжения источников напряжения.

6. Сопряжение аналоговой электрической модели с современным компьютером, что позволит не только упростить снятие и фиксацию результатов измерений, но и снять некоторые количественные ограничения, обусловленные применением осциллографа для наблюдения переходного процесса (в частности, не привязываться к минимальной частоте переключения электромагнитного ключа).

Эти разнородные вопросы в принципе могут быть решены специалистами фирм разного профиля, причем каждое решение может найти самостоятельное применение помимо использования в специальных электрических моделях.

Кроме того такое направление исследований открывает возможность разработки как в гидравлике, так и в электро-радиотехнике новых устройств, принципы работы которых основаны на использовании нестационарных процессов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование. – М. : Машгиз, 1959. – 74 с.
2. Фомин А. К. Электрическая модель гидроэнергетической установки / Сб. стат. научн. студенческого общества МЭИ. – М. : ГЭИ, 1955. – № 5. – С. 212 – 240.
3. Фильчиков П. Ф. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге / П. Ф. Фильчиков, В. И. Панчишин. – К. : Техіка, 1961. – 171 с.

УДК 669. 15-194

ПОЛИГОНИЗАЦИЯ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ В АУСТЕНИТЕ И ФЕРРИТЕ ПРИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Д. В. Лаухин, д. т. н., с. н. с.

Ключевые слова: *микролегированная сталь, контролируемая прокатка, листовой прокат, структура, субструктура, полигональные границы*

Введение. Интерес к высотному строительству постоянно растет, это связано в первую очередь с тем, что современное строительство ведется, как правило, в уже застроенных центральных районах городов, где стоимость земли велика, а площади, пригодные для возведения зданий, малы. Строительство новых высотных зданий предполагает использование стального каркаса, поскольку здания, исполненные только в железобетоне, имеют весьма значительные ограничения по этажности.

Анализ публикаций. Строительство нового жилья возможно не только на новых площадках, но и в застроенных районах путем надстройки многих этажей над уже существующими зданиями. Такая надстройка выполняется из каркаса, который, опираясь на