

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 622.24

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-15-24

МОДЕЛЬ ПНЕВМОМЕТРИЧНОГО ГУСТИНОМІРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

*М. В. Шавранський, В. С. Борин, І. І. Чигур, Г. Г. Зварич, О. В. Кучмистенко,
О. Г. Малько*

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: m.shavranskyu@gmail.com

Розробка автоматичних пневмометричних густиномірів є перспективною не тільки для бурових розчинів. Вони можуть знайти застосування в харчовій, хімічній, нафтопереробній промисловості, на нафтобазах і нафтоосховищах. На їх основі можна будувати системи кількісного обліку рідких продуктів в одиницях маси. Володіючи високою точністю, пневмометричні густиноміри прості та надійні, зручні в експлуатації і, найголовніше, комплектуються із елементів, що серійно випускаються промисловістю. В статті наведена структурна схема диференціального пневмометричного густиноміра з компенсатором баластного тиску в мінусовій пневмолінії та показано розрахунок з якого видно, що основним джерелом похибки є втрати тиску в пневмолініях, дрейф нуля дифманометра, відміна реальних значень коефіцієнтів статичної характеристики дифманометра від номінальних. Вказано на те, що для знаходження значення тиску та витрати в кожній точці пневмолінії, навіть для простих моделей, потрібно робити складні розрахунки. Аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для окремих випадків, які не представляють практичну цінність. Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідрравлічної аналогії (ЕГДА) і перейти від пневматичної лінії з розподіленими параметрами до аналогічної електричної з зоредженими параметрами. Нами отримана модель пневмометричного густиноміра у вигляді електричної схеми, яка потребує подальшого дослідження, методами електротехніки, для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі та перевірки її на адекватність.

Ключові слова: пневмометричний густиномір, буровий розчин, похибка, вимірювання, модель, тиск, витрата, рідина.

Разработка автоматических пневмометрических плотномеров является перспективной не только для буровых растворов. Они могут найти применение в пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, на нефтебазах и нефтехранилищах. На их основе можно строить системы количественного учета жидких продуктов в единицах массы. Обладая высокой точностью, пневмометрические плотномеры простые и надежные, удобные в эксплуатации и, самое главное, комплектуются из элементов, серийно выпускаемых промышленностью.

В статье приведена структурная схема дифференциального пневмометрического плотномера с компенсатором балластного давления в минусовой пневмолинии и показан расчет из которого видно, что основным источником погрешности является потери давления в пневмолинии, дрейф нуля манометр, отмена реальных значений коэффициентов статической характеристики манометр от номинальных. Указано на то, что для нахождения значения давления и расхода в каждой точке пневмолинии, даже для простых моделей, нужно делать сложные расчеты. Аналитическое решение может быть получено только для частных случаев, не представляют практическую интерес.

Поэтому для анализа пневмолинии плотномера рационально воспользоваться методом электрогидравлической аналогии (ЭГДА) и перейти от пневматической линии с распределенными параметрами к аналогичной электрической с сосредоточенными параметрами. Нами получена модель пневмометрического плотномера в виде электрической схемы, которая требует дальнейшего исследования,

методами електротехніки, для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі і перевірки її на адекватність.

Ключевые слова: пневмометрические плотномеры, буровой раствор, погрешность, измерения, модель, давление, расход, жидкость.

The development of automatic pneumometric densitometers is promising not only for drilling fluids. They can be used in the food, chemical, refining, oil depots and storage facilities. Based on them, you can build systems for quantitative accounting of liquid products in units of mass. Possessing high accuracy, pneumometric densitometers are simple and reliable, convenient in operation and, most importantly, are completed with the elements serially issued by the industry.

The article presents a block diagram of a differential pneumometric densitometer with ballast pressure compensator in the minus pneumoline and shows the calculation which shows that the main source of error is the pressure loss in the pneumolines, zero drift of the differential pressure gauge, cancellation of real values of static coefficients from differential. It is pointed out that in order to find the value of pressure and flow at each point of the pneumoline, even for simple models, it is necessary to make complex calculations. An analytical solution can only be obtained for individual cases that are of no practical value.

Therefore, for the analysis of a pneumoline of a densitometer it is most rational to use a method of electrohydraulic analogy (EGDA) and to pass from a pneumatic line with the distributed parameters to similar electric with rarefied parameters. We obtained a model of a pneumometric densitometer in the form of an electrical circuit, which requires further research, electrical engineering methods, to clarify the coefficients and parameters of the model and check its adequacy.

Key words: pneumometric densitometer, drilling mud, error, measurement, model, pressure, flow, liquid.

Підвищення ефективності процесу буріння багато в чому визначається скороченням часових, матеріальних і трудових затрат на ліквідацію аварій, зокрема аварій, пов'язаних з флюїдопроявами. Зниження числа вказаних аварій можливе при вирішенні задачі оперативного контролю параметрів промивної рідини на вході і виході свердловини. Одним із основних контрольованих параметрів процесу буріння нафтогазових свердловин є густина бурових розчинів [1].

Складність розв'язку цієї задачі обумовлена вимогами вимірювання густини на потоці з абсолютною похибкою 10 кг/м^3 в діапазоні густин $800 \div 2600 \text{ кг/м}^3$.

Задача побудови автоматичних густиномірів з такими характеристиками є перспективною та актуальною, оскільки при зниженні абсолютної похибки вимірювання до $5 \div 10 \text{ кг/м}^3$ можливе застосування високопродуктивного рівноважного режиму буріння (за гідростатичним тиском на забій) без остраху аварій та ускладнень [2].

Густина є основним визначаючим параметром бурових рідин. В процесі будівництва свердловини необхідно безперервно контролювати густина бурових рідин в декількох точках циркуляційної системи бурової, а саме, на вході свердловини в приймальних ємностях і ємності для доливу і на

виході із свердловини – в жолобі. Рідина в цих точках знаходиться в постійному русі, причому потік безнапірний і рівень рідини постійно змінюється. В приймальних ємностях рідина постійно перемішується, щоб не було осідання твердої фази.

Бурові рідини представляють собою полідисперсну гетерогенну систему, що складається як мінімум з двох компонентів – глини та води, фізико-хімічно зв'язаних між собою. Необхідно зазначити, що глинистий розчин не представляє собою просту механічну суміш глини з водою, так як процеси, що проходять при приготуванні глинистого розчину, набагато складніші, ніж просто розмішування.

В дисперсній фазі глинистого розчину по степені дисперсності розрізняють такі частинки [2]:

- елементарні глинисті пластинки («великі молекули»);
- первинні глинисті частинки, що представляють собою пачки «великих молекул»;
- агрегати із первинних глинистих частинок;
- високодисперсні частинки мінералів, що знаходяться в глині як механічні домішки;
- пісок, що складається з частинок кварцу і інших інертних порід, а також з великих грудочок глини, що не розчинилися.

Крім того, сольовий склад дисперсного середовища робочого глинистого розчину визначається електролітами, що є у воді, з якої приготавлиється розчин. Також – іонами, що переходять в рідку фазу з глини, яка застосовується для приготування розчину, солями мінералізованих пластових вод, що попадають в розчин з порід, які проходять при бурінні.

Вибір способу вимірювання густини бурових розчинів обумовлений декількома факторами [3]:

1. Фізико-хімічні властивості рідини.
2. Гідродинамічні характеристики потоку.
3. Технологічність процесу вимірювання.
4. Роботоздатність густиноміра в реальних умовах.
5. Точність вимірювання.

При виборі методу вимірювання густини бурових рідин, виходячи із їх фізико-хімічних властивостей, визначальними будуть ті властивості, які приводять до налипання частинок глини або осадження механічних домішок на робочий орган або робочу камеру густиноміра. Із розглянутих в [4] способів найбільш відповідним є пневмометричний. При використанні поплавкових і пікнометричних методів значно збільшується загальна похибка вимірювання за рахунок осадження та налипання частинок, для зниження якої необхідні значні витрати (надання поплавку певної форми, вібрація його або вагової камери в пікнометричному методі і т.п.). Така проблема існує і для пневмометричного способу, проте рішення її набагато простіше, оскільки вертикальний потік, або той що набігає, частково знімає налипання з пневмотрубок. Існує множина простих технічних рішень по захисту трубок від налипання. Рекомендується [2] робити кінець трубки, що опускається в рідину, наконечником у вигляді патрубка великого діаметра, косо зрізаного в нижній частині та закритого похилим дном. Цікавим також є рішення [2], в якому пропонується п'єзометричні трубки розташовувати концентрично та покривати матеріалами з високими гідрофобними властивостями.

Потік рідини вносить додаткову похибку в результат вимірювання будь-яким способом із-за швидкісного напору, що впливає на робочий орган або робочу камеру густиноміра. Характер

плинності бурового розчину в жолобній системі бурової установки та в приймальних ємностях можна вважати ламінарним; тому додаткова похибка є низькочастотною, так як визначається в основному швидкістю потоку, що плавно змінюється в часі. Тому для відлагодження від впливу потоку доцільно застосовувати структурні методи підвищення точності, з яких найбільш перспективні тестові, що не вимагають «вимкнення» величини, яка вимірюється від входу вимірюваної системи. З цієї точки зору також кращий пневмометричний спосіб вимірювання густини, так як для нього відсутня проблема формування мультиплікативного тесту по вимірюваному параметру – перепаду тиску на вимірювальній трубці. При використанні двох п'єзометричних трубок мультиплікативний тестовий вплив досягається при зміні глибини занурення однієї з трубок.

В загальну похибку вимірювання густини будь-яким способом входить температурна похибка, проте це враховується лиш при приведенні густини, що вимірюється до нормальних умов, а буровій така задача не ставиться.

Що стосується технологічності процесу вимірювання, то перевага також віддається пневмометричному методу із-за простоти установки та обслуговування вимірювальної трубки безпосередньо на жолобі, що створює невеликий підпір рідини (до 0,5 м) за допомогою заслінки.

Деякі труднощі виникають при очистці та осушці технологічного стисненого повітря, що використовується на буровій, але ці проблеми вирішуються відомими методами [5].

Вимоги до точності вимірювання густини бурових розчинів досить жорсткі і на ні одним із перерахованих вище методів в умовах бурової не досягаються. Наприклад, в інструкції по ранньому виявленню газонафтоводопроявів і їх попередженню в переліку показників, за якими отримують інформацію по ранньому виявленню газонафтоводопроявів, вказана густина бурового розчину на вході та на виході із свердловини в діапазоні $800 \div 2600 \text{ кг/м}^3$ з максимальною абсолютною похибкою 10 кг/м^3 , тобто приведена похибка складає 0,42%. Аналогічні вимоги висуваються при використанні високопродуктивного

рівноважного режиму буріння за гідростатичним тиском.

Навіть якщо вдасться будь-яким чином абстрагуватися від впливу перешкод (завад) в каналі вимірювання і від зовнішніх неконтрольованих впливів, для досягнення точності, що вимагається, необхідно застосовувати вторинні перетворювачі класу не нижче, ніж 0,4, і підтримувати його в умовах бурової, що проблематично. Тому єдиною альтернативою є використання структурних методів підвищення точності вимірювання і тут перевага також залишається за пневмометричними густиномірами за міркуваннями наведеними вище.

Похибка вимірювання пневмометричним способом складає $1,5 \div 2,5$ %. Основну долю похибки в нормальних умовах вносить дифманометр. Промисловістю випускаються та доступні для широкого застосування перетворювачі тиску типу «Сапфир-22ДД» [6, 7] мають клас точності 0,5%; 0,25%; 0,15%; 0,1%. Значний вклад в утворення загальної похибки вимірювання густини цим методом вносять неоптимальність конструктивних розмірів вимірювальних трубок і режим закінчення повітря з них, а також втрати тиску в пневмолініях. Крім того, при відриві бульбашок

повітря виникають інфразвукові коливання тиску в лініях.

Тому найкращим на буровій є пневмометричний спосіб вимірювання густини з використанням структурних методів підвищення точності для зменшення похибок тракту вимірювання.

На рис.1 наведена структурна схема диференційного пневмометричного густиноміра з компенсатором баластного тиску в мінусовій пневмолінії, що вміщує джерело живлення стиснутим повітрям на два незалежних канали, вмикаючий стабілізатор тиску повітря 1 і два регулятори витрати повітря 2 і 3, дифманометр 4, компенсатор баластного тиску 5 у вигляді герметичної посудини, заповненої еталонною рідиною з густиною ρ_0 , в яку занурена барботажна трубка на глибину H_0 і двох вимірювальних трубок 6 і 7, занурених в контролюючу рідину на глибини H_1 і H_2 . Густина рідини таким густиноміром визначається за перепадом тиску між кінцями вимірювальних трубок, який в ідеальному випадку рівний

$$\Delta P = \rho g H_1 - \rho g H_2 = \rho g (H_1 - H_2),$$

ρ – густина рідини;

g – гравітаційна стала ($9,81 \text{ м/с}^2$).

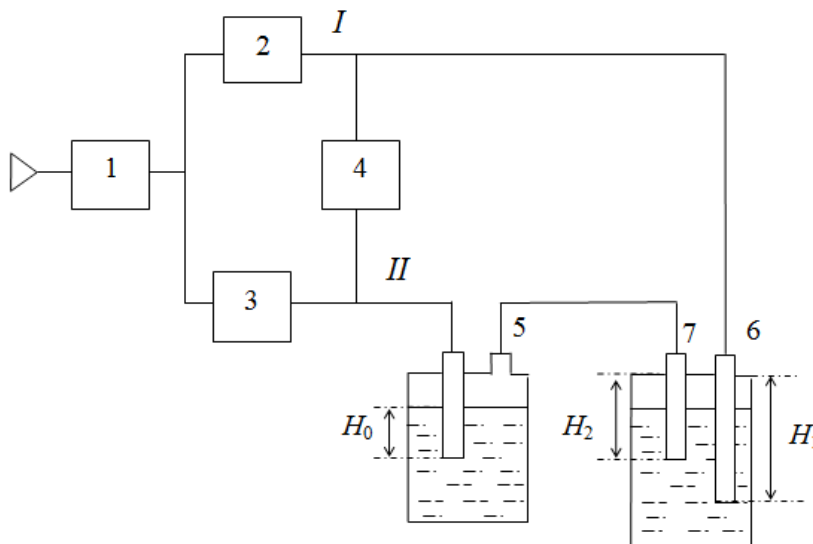


Рисунок 1 – Структурна схема диференційного пневмометричного густиноміра

Реально дифманометр вимірює перепад тиску між точками I і II пневмоліній, тиск в яких рівний

$$\begin{aligned} P_1 &= \rho g H_1 + P_{Л1} + P_{\sigma 1} + P_{V1}, \\ P_2 &= \rho g H_2 + P_{Л2} + P_{\sigma 2} + P_{V2} + P_0 \\ \Delta P_{12} &= \Delta P - P_0 - P_{BT} \end{aligned}$$

де $P_0 = \rho_0 g H_0$ - перепад тиску в конденсаторі;

$P_{Л1}, P_{Л2}$ - втрати тиску із-за тертя повітрям;

$P_{\sigma 1}, P_{\sigma 2}$ - надлишковий тиск, необхідний для відриву бульбашок повітря від зрізу трубок;

P_{V1}, P_{V2} - тиски обумовлені швидкісним напором потоку при обтіканні кінців трубок.

$$P_{BT} = P_{Л1} - P_{Л2} + P_{\sigma 1} - P_{\sigma 2} + P_{V1} - P_{V2}.$$

Нехай номінальна статична характеристика дифманометра має вигляд

$$y = a_0 + a_1(P_1 - P_2),$$

де a_0, a_1 - коефіцієнти моделі статичної характеристики;

y - вихідний сигнал дифманометра (струм, напруга і ін.).

Тоді дифманометр 4 покаже:

$$y = a_0 + a_1(\Delta P - P_0 - P_{BT}) = a_0 + a_1(\rho g(H_1 - H_2) - P_0 - P_{BT})$$

Густина контрольованої рідини рівна

$$\rho = \frac{P_0}{g(H_1 - H_2)} + \frac{y}{a_1 g(H_1 - H_2)} - \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_1 g(H_1 - H_2)}$$

Якщо перепад тиску в компенсаторі 5 підібрати так, щоб

$$P_0 = \rho_{min} g (H_1 - H_2)$$

де ρ_{min} - мінімальне значення густини контрольованої рідини, то

$$\rho = \rho_{min} + \frac{y}{a_1 g(H_1 - H_2)} - \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_1 g(H_1 - H_2)}. \quad (1)$$

Ральні значення коефіцієнтів моделі статичної характеристики a_{0i} і a_{1i} відрізняються від номінальних, внаслідок впливу зовнішніх факторів (температура, вологість, і ін.), а також із-за старіння дифманометра. Отже, за показниками дифманометра реально виходить величина

$$\rho^* = \rho_{min} + \frac{y}{a_{1i} g(H_1 - H_2)} - \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_{1i} g(H_1 - H_2)}. \quad (2)$$

Із (1) і (2) видно, що основними джерелами похибки пневмометричного густиноміра є втрати тиску в пневмолініях, дрейф нуля дифманометра, відмінність реальних значень

коефіцієнтів статичної характеристики дифманометра від номінальних. Крім того, похибка нелінійності дифманометра повністю входить в результуючу похибку вимірювання густини.

Із (2) також видно, що результуюча похибка має як адитивну, так і мультиплікативну складові.

Мультиплікативна складова похибки обумовлена нестабільністю коефіцієнта чутливості a_{1i} , що повільно змінюється за рахунок зміни параметрів мембрани дифманометра і інших елементів перетворювача, а також за рахунок дії зовнішніх факторів; мультиплікативної також є похибка нелінійності дифманометра.

Адитивна складова похибки обумовлена дрейфом нуля дифманометра, нестабільністю коефіцієнтів a_{0i} і a_{1i} , а також наявністю перепаду тиску в пневмолініях густиноміра, тиску P_{σ} і швидкісним напором потоку.

Для визначення величини і характеру зміни тиску в пневмолініях густиноміра розглянемо математичну модель одного пневмоканалу, що має регулятор витрати повітря, гладку трубку, до якої за допомогою з'єднувальної арматури (штуцер, трійники, перевідники) приєднані п'єзометрична трубка та камера дифманометра.

Нестала ламінарна плинність газу в пневмоканалі густиноміра, характерна для загального випадку роботи, описується системою рівнянь в частинних похідних:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ \\ -\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

де x - осьова координата пневмоканалу;

t - час;

$P(x,t), Q(x,t)$ - тиск і витрата газу в перетині каналу;

c - швидкість звуку в газі;

a - сталий коефіцієнт.

При цьому тиск $P(x,t)$ аналогічно напрузі в довгій лінії, витрата $Q(x,t)$ аналогічна струму в лінії, а коефіцієнти в рівнянні представляють собою комбінації із параметрів довгої лінії - індуктивності, ємкості і опору [8].

Граничними умовами для (3) будуть такі:

1. На початку пневмолінії витрата газу рівна витраті, яка встановлена регулятором.

$$Q(0,t) = Q_0 \quad (4)$$

2.В кінці пневмолінії на зрізі п'єзометричної трубки тиск визначається глибиною занурення рідини, надлишковим тиском, який викликаний поверхневим натягом і швидкісним напором рідини

$$P_0(l, t) = \rho g H + P_\sigma(t) + P_V \quad (5)$$

Розв'язати (3) можна за допомогою операційного числення.

Якщо

$$\begin{aligned} P(x, s) &\Rightarrow P(x, t) \\ Q(x, s) &\Rightarrow QP(x, t) \end{aligned}$$

то система (3) прийме такий вигляд:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = sQ + 2aQ \\ -sP = c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

Виключимо з (6) $Q(x, s)$, отримаємо рівняння

$$\frac{d^2 P}{dx^2} - \lambda^2 P = 0$$

де $\lambda^2 = \frac{s(s+2a)}{c^2}$,

розв'язком якого буде

$$\begin{cases} P(x, s) = Ae^{\lambda x} + Be^{-\lambda x} \\ Q(x, s) = \frac{\lambda}{s+2a} (Be^{-\lambda x} - Ae^{-\lambda x}) \end{cases}$$

Постійні коефіцієнти A і B знаходяться із граничних умов

$$Ae^{\lambda x} + Be^{-\lambda x} = P_0(l, s)$$

$$\frac{\lambda}{s+2a} (B-A) = \frac{Q_0}{s}$$

і за формулами

$$A = \frac{1}{2ch\lambda l} \left[P_0(l, s) - \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} e^{-\lambda l} \right]$$

$$A = \frac{1}{2ch\lambda l} \left[P_0(l, s) + \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} e^{-\lambda l} \right],$$

Розв'язком системи (6) буде: знаходження тиску та витрати в кожній точці пневмолінії для будь-якого моменту часу необхідно знайти зворотне перетворення для (7). Навіть для простих моделей $P_0(l, s)$ це приводить до дуже складних розрахунків і аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для деяких окремих випадків, що не представляє практичну цікавість.

Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідролінійної аналогії (ЕГДТ) [8 -10] і перейти від пневматичної лінії з розподіленими

параметрами до аналогічної електричної з зосередженими.

Перехід від лінії з розподіленими параметрами до лінії з зосередженими параметрами коректний при виконанні такої умови

$$(2 \div 2,5)L < \frac{l_{зг}}{2}$$

$$\begin{cases} P(x, s) = \frac{1}{ch\lambda l} \left[P_0(l, s) ch\lambda x - \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} ch\lambda(x-l) \right] \\ Q(x, s) = -\frac{1}{ch\lambda l} \left[\frac{P_0(l, s) ch\lambda x}{c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}}} - \frac{Q_0}{s} ch\lambda(x-l) \right] \end{cases} \quad (7)$$

Для знаходження тиску та витрати в кожній точці пневмолінії для будь-якого моменту часу необхідно знайти зворотне перетворення для (7). Навіть для простих моделей $P_0(l, s)$ це приводить до дуже складних розрахунків і аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для деяких окремих випадків, що не представляє практичну цікавість.

Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідролінійної аналогії (ЕГДТ) [8 -10] і перейти від пневматичної лінії з розподіленими параметрами до аналогічної електричної з зосередженими. Перехід від лінії з розподіленими параметрами до лінії з зосередженими параметрами коректний при виконанні такої умови

$$(2 \div 2,5)L < \frac{l_{зг}}{2}$$

L – довжина ділянки лінії, що підлягає заміні;

$l_{зг}$ – мінімальна довжина хвилі звуку в лінії.

Джерелом звукової хвилі в пневмолінії густиноміра є пульсуючий тиск при барботажі бульбашок повітря в трубі, а також імпульсна зміна тиску при можливих комутаціях лінії.

Максимальна частота проходження бульбашок в п'єзометрах не перевищує $f=10$ Гц. Це відповідає довжині хвилі звуку приблизно 34 м.

Враховуючи, що час перемикання при комутації пневмолінії засобами пневмоавтоматики складає 0,1 с, причому клапан є інерційним елементом, еквівалентна

частота збурювального впливу не перевищує 5 Гц.

Таким чином, для пневмометричного густиноміра $l_{зв} = 34$ м.

Звідси максимальна довжина ділянки лінії, що розглядається як зосереджена і складає

$$L_{max} < \frac{l_{зв}}{5} \approx 6,8 \text{ м}$$

При переході до пневматичної лінії із зосередженими параметрами її ділянку довжиною менше L_{max} замінюють еквівалентною схемою, зображеною на рис.2. Ділянка 1 моделює повний пневматичний опір лінії R_n . Ділянка 2 моделює інерційні властивості повітря (пневматична індуктивність L_n).

Ділянка 3 моделює пневматичну ємкість лінії C_n . Величина R_n визначається із закону Пуазейля при ламінарному плинні [11].

$$R_n = \frac{128 \cdot \eta}{\pi D^4} L$$

де η - динамічна в'язкість газу;

D – діаметр пневмолінії;

L – довжина ділянки лінії.

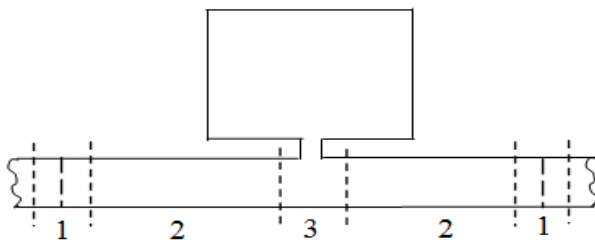


Рисунок 2 – Еквівалентна пневматична схема ділянки лінії

Пневматична ємкість C_n визначається із такого співвідношення для газів (диференціальна форма узагальненого газового закону):

$$\frac{V}{\rho_n RT} \frac{dP}{dt} = Q, \quad (8)$$

ρ_n - густина повітря;

R – газова стала;

V – об'єм лінії;

T – абсолютна температура.

Звідси

$$C_n = \frac{V}{\rho_n RT} = \frac{\pi D^2}{4 \rho_n RT} L$$

Для повітря при тисках, близьких до атмосферного, і об'ємах ліній, що не перевищують $25 \cdot 10^{-5}$ м³, пневматичною індуктивністю L_n можна знехтувати і не враховувати в подальших розрахунках. Еквівалентне електричне коло із зосередженими параметрами зображено на рис.3.

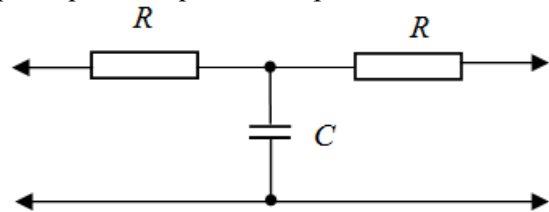


Рисунок 3 – Еквівалентна електрична схема ділянки лінії

При переході до електричної лінії для розрахунку її параметрів, задавшись масштабами струму і напруги, еквівалентних витрати і перепаду тиску в лінії, розраховують параметри R і C таким чином, щоб зберігались співвідношення між пневматичним опором в законі Пуазейля і електричним опором в законі Ома, а також між пневматичною ємкістю в рівнянні (8) та законом зміни струму через ємкість.

Наприклад, для масштабу струму $m_i = 10^{-3}$ А/м³ і масштабу напруги $m_u = 10^{-3}$ В/Па при $D = 0,004$ м отримаємо питомі опори та ємкості повітряної лінії при $T = 293$ К:

$$R_{num} = \frac{m_u}{m_i} = \frac{128\eta}{\pi D^4} = 2,737 \text{ Ом/м}$$

$$C_{num} = \frac{m_i}{m_u} = \frac{\pi D^2}{4 \rho_n RT} = 1,07 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}$$

В електричному еквіваленті пневмолінії густиноміра раціонально виділити такі елементарні ділянки:

1. Регулятор витрати повітря (РВП) як джерело струму.

2. Ділянка лінії від РВП до точки під'єднання дифманометра як електричне коло (див. рис.3).

3. З'єднувальна лінія і камера дифманометра як ємкість так як потік повітря в цій лінії відсутній, а припливом повітря за рахунок стисливості можна знехтувати через малість діапазону зміни тиску.

4. Ділянка лінії від точки приєднання дифманометра до зрізу барботажної як електричне коло приведена на рис.3.

5. Потік рідини як джерело напруги, є функцією густини ρ і глибини занурення трубки H .

Для побудови електричної моделі потоку рідини необхідно розглянути детальніше процеси, що проходять на межі поділу газ – рідина. Для бульбашки сферичної форми радіусом r тиск на межі розділу рівний

$$P = \rho g H + \frac{2\sigma}{r},$$

де σ - поверхневий натяг;

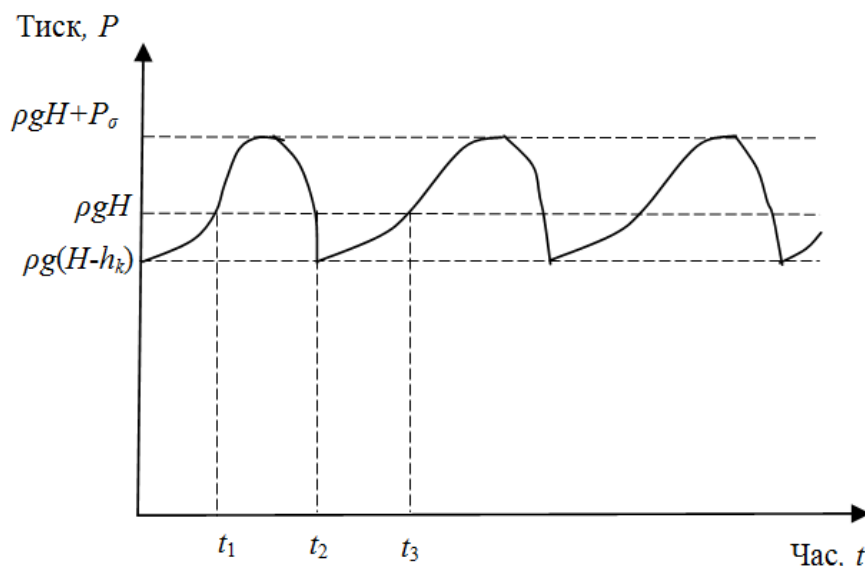


Рисунок 4 – Зміна тиску на кінці пневмотрубки

При появі меніска, що випускається на початку росту бульбашки появляются сили поверхневого натягу, які долаються додатковим тиском, рівним $P\sigma$ (момент часу t_1).

Починаючи з цього моменту часу відбуваються наростання об'єму повітряної бульбашки, збільшення її радіусу і зростання тиску в ньому. В момент часу t_2 радіус бульбашки досягає критичного значення $r_{кр}$, при якому виштовхуюча сила F_1 рівна силі поверхневого натягу F_2 :

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho - \rho_2),$$

$$F_2 = \pi d \sigma,$$

де ρ_2 – густина газу.

Отже

P – тиск газу в бульбашці.

При формуванні межі розділу на зрізі трубки при $r \rightarrow \infty$ буде

$$P = \rho g H.$$

Процес розширення та стиснення бульбашки повітря описується в сферичній системі координат відомим рівнянням [12], розв'язати яке можна лиш чисельними методами. Тому для побудови електричної моделі необхідно розглянути якісну картину утворення і зрізу газової бульбашки на кінці трубки (рис.4).

$$r_{кр} = \sqrt[3]{\frac{3d\sigma}{4g}(\rho - \rho_2)}.$$

В цей момент відбувається відрив бульбашки, при цьому з трубки захоплюється частина газу і в неї заходить рідина за рахунок капілярних сил, а тиск в ній зменшується до величини $\rho g(H - h_k)$, де h_k – величина капілярного підняття.

Далі рідина з трубки витісняється і тиск в ній зростає $\rho g H$ до (момент часу t_3), при якому відбувається утворення опуклого меніска, і процес повторюється. Якщо трубка обтікається потоком рідини, то коливання тиску будуть відбуватися відносно величини $\rho g H + P_v$, що корелює з квадратом швидкості потоку.

Величини $t_2 - t_1$ і $t_3 - t_2$ залежать від витрати газу в трубі і визначаються таким чином:

$$(t_2 - t_1)Q = \frac{4}{3}\pi r_{кр}^3,$$

$$(t_3 - t_2)Q = \frac{\pi d^2}{4} h_{кр}.$$

Величини капілярного підняття залежить від витрати газу і її природно припустити у вигляді

$$h_{кр} = h_{крmax}(1 - \alpha Q).$$

При відсутності витрати газу ця величина максимальна

$$h_{крmax} = \frac{\sigma}{\rho g d}.$$

Для максимальної витрати Q_{max} , при якому починається «факельний» режим, $t_3 = t_2$, тобто

$$\alpha = \frac{\pi d \sigma}{4 \rho g Q_{max}}.$$

Отже,

$$t_2 - t_1 = \frac{\pi d \sigma}{g(\rho - \rho_2)Q},$$

(9)

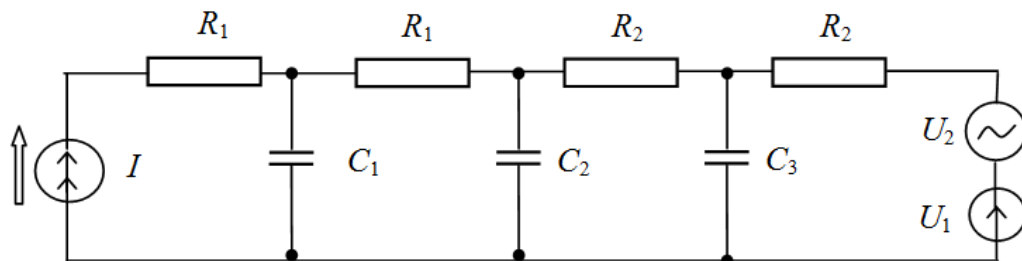


Рисунок 5 – Еквівалентна електрична схема пневмолінії густиноміра

На схемі U_1 моделює сталий підпір тиску $\rho g H$, а джерело U_2 – змінне у відповідності з (10) і (11), джерело струму I – регулятор витрати, RC – коло, моделює пневмолінію густиноміра та камеру дифманометра. Тиск в камері дифманометра моделюється напругою на ємкості C_3 .

Для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі та перевірки її на адекватність потрібно проводити експериментальне дослідження.

Список використаних джерел

1. Шавранський М. В. Система контролю для запобігання прихоплень бурильної колони в

$$t_3 - t_2 = \frac{\pi d \sigma}{4 \rho g Q} (1 - \alpha Q).$$

Для практичної моделі на ділянці $t_2 - t_1$ тиск на кінці трубки можна апроксимувати:

$$P_1 = \rho g H + \frac{2\sigma}{r_{кр}} \approx \rho g H + 4\sigma^3 \sqrt{\frac{\rho g}{3d\sigma}} \quad (10)$$

а на ділянці $t_3 - t_2$

$$P_2 = \rho g (H - h_{кр}) + \rho g h_{кр} \frac{t}{t_3 - t_2}.$$

Або з врахуванням (9)

$$P_2 = \rho g H - \frac{\sigma}{d} (1 - \alpha Q) + \frac{4 \rho g Q}{\pi} t.$$

Таким чином, потік рідини на електричній моделі можна представити як джерело змінної напруги, що генерує напругу за законом зміни тиску, яке представлено залежностями (10) і (11).

На рис.5 зображена еквівалентна електрична схема пневмолінії густиноміра.

процесі буріння: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин" / Шавранський Михайло Васильович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003. 20 с.

2. Кравец М.З., Миронов В.П. Методы и средства автоматического измерения плотности буровых растворов. М.:ВНИИОЭНГ, 1989. – (Обзор. информ. Сер. «Автоматизация и телемеханизация в нефтяной промышленности»).

3. Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы. М.: Недра, 1979. 344 с.

4. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.

5. Ибрагимов И.А., Фарзани Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. – М.: Высшая школа, 1985. – 544 с.

6. <http://manometr.net.ua> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Манометр – полная картина жизни. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://manometr.net.ua> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

7. <http://www.avtomatica.org> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Автоматика. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://www.avtomatica.org> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

8. Костишин В. С. Моделирование режимов работы відцентрових насосів на основі електрогідролічної аналогії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища" / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003. 31 с.

9. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 177 с.

10. Попов Д. Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 239 с.

11. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. посібник. К.: НАУ, 2004. 336 с.

12. Лаптев В.И. Барботажно-пъезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.

References

1. Shavranskyi M. V. Systema kontrolju dlja zapobihannja prychoplen burylnoi kolony v prozesh burinnja: avtoref. dys. na zdobuttja stupenja kand. techn. nauk: spez.05.11.13 «Prylady i metody kontrolju ta vyznachennja skladu rehovyn» / Shavranskyi Mychajlo Vasylyjovych; Ivano-Frankiv.naz.techn.un-t nafty i gasu. Ivano-Frankivsk, 2003. 20 s.

2. Kravez M.Z., Mironov V.P. Metody i sredstva avtomaticheskoho izmerenija plotnosti byrovych rastvorov. – М.: VNIIOENG, 1989. (Obzor. inform. Ser. «Avtomatisazija i telemehanizazija v neftjanoy promyshlenosti»)

3. Isakovich R.Ja. Technologicheskie izmerenija i pribory. М.:Nedra, 1979. 344 s.

4. Kulikovskij K.L., Kuper V.Ja. Metody i sredstva izmerenija. М.: Energoatomizdat, 1986. 448 s.

5. Ibragimov I.A., Farzane N.G., Iljasov L.V. Elementy i sistemy pnevmoavtomatyky. М.: Vysshaja shkola, 1985. 544 s.

6. <http://manometr.net.ua> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Манометр – полная картина жизни. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://manometr.net.ua> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

7. <http://www.avtomatica.org> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Автоматика. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://www.avtomatica.org> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану

8. Kostyshyn V.S. Modeluvannja rezymiv roboty vidzentrovanych nasosiv na osnovi elektrogidravlichnoi analogii: avtoref. dys. na zdobuttja stupenja d-ra techn. nauk: spez. 05.15.13 «Naftogazoprovody, bazt ta schovyscta»/Kostyshyn Volodymyr Stepanovych; Ivano-Frankiv.naz.techn.un-t nafty i gasu. Ivano-Frankivsk, 2003. 31 s.

9. Zalmanov L.A. Teorija elementiv pnevmoavtomatyky. М.: Nauka, 1969.-177 с.

10. Popov D.N. Nestazionarnye gidrodinamicheskie prozessy. М.: Mashinostoenije, 1982.239 s.

11. Kolchunov V.I. Teoretychna ta prykladna gidromehanika: Navch.posibnyk. К.:NAU, 2004. 336 s.

12. Laptev V.I. Barbotazno-pъezometrisheskije metody kontrolja fiziko-chimicheskikh svojstv zidkosteij. М.: Energoatomizdat, 1984. 80 s.