

## ВРАХУВАННЯ АНОМАЛІЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИН ПРИ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ АВАРІЙНОГО ЗЛИВУ

В статті розглянуто особливості розрахунку систем аварійного зливу нафти. Вказано, що спрощення, які приймають при розрахунку систем аварійного зливу, приводять до значних похибок у обчисленні часу спорожнення посудин. Показано доцільність використання закону Освальда де Віля в залежностях для гідравлічного розрахунку систем аварійного зливу. Враховуючи ці особливості в роботі наведені формули для обчислення втрат напору по довжині трубопроводу та запропоновано формулу для визначення критичного числа Рейнольдса для течії псевдопластичних рідин.

**Ключові слова:** системи аварійного зливу, час спорожнення апарата, псевдопластичні рідини, число Рейнольдса.

**Вступ.** З метою запобігання поширенню пожежі по виробничих приміщеннях найбільш дієвим заходом є повна або часткова евакуація горючої речовини. У випадку, коли такими речовинами є рідини, застосовують їх видалення через системи аварійного зливу у спеціальні підземні резервуари, які розташовані поза аварійною будівлею. Від ефективності роботи таких систем залежить безпека робіт з ліквідації надзвичайної ситуації в цехах підприємств.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Гідравлічний розрахунок систем аварійного зливу полягає у визначенні діаметра з'єднувальних трубопроводів. Згідно з рекомендаціями [1], цей діаметр має становити не менше 100 мм. Одночасно, згідно з методикою розрахунку систем аварійного зливу [2], конструктивні параметри системи визначають за тривалістю часу аварійного зливу із апарата  $T_{ав.зл.}$ , який має бути меншим за допустимому тривалість аварійного режиму  $T_{ав.реж.}$ . Час аварійного зливу включає час спорожнення апарата  $T_{спор.}$ , який в загальному випадку, визначають за відомою в гідравліці моделлю спорожнення посудини із змінною по висоті  $z$  площею поперечного перерізу  $\Omega_z = f(z)$  за відсутності притоку в посудину [3]:

$$T_{спор.} = \frac{1}{\mu_c \omega \sqrt{2g}} \int_{z_2}^{z_1} \frac{\Omega_z dz}{\sqrt{z}}, \quad (1)$$

де  $z_1$  і  $z_2$  – напори відповідно на початку і в кінці зливу, м;  $\omega$  – площа живого перерізу вихідного отвору трубопроводу системи зливу, м<sup>2</sup>;  $\mu_c$  – коефіцієнт витрати системи аварійного зливу, який, своєю чергою, залежить від напору витікання –  $\mu_c = f(z)$ .

Для розв'язку (1) у методиці [2] приймають ряд спрощень, а саме:

- постійність коефіцієнта витрати системи ( $\mu_c = const$ );
- постійність по висоті площі поперечного перерізу апарата ( $\Omega_z = const$ ).

При рішенні прямої задачі задаються схемою обв'язки трубопроводів із зазначенням відміток  $z$ , діаметром трубопроводу системи зливу  $d$ , характеристикою місцевих опорів  $\zeta$  та кінематичною в'язкістю рідини  $\nu$ . Далі визначають пропускну здатність системи  $Q$  при максимальному і мінімальному напорах, і на основі середньої пропускну здатності визначають тривалість спорожнення аварійної посудини  $T_{спор.}$ . У випадку, якщо  $T_{ав.зл.} > T_{ав.реж.}$ , збільшують діаметр трубопроводу  $d$  (при самотічному витіканні).

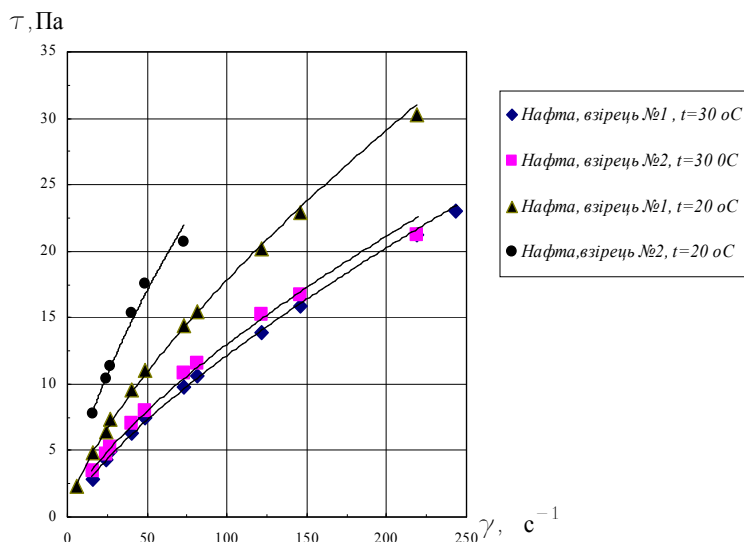
Проте, через зроблені спрощення, такий підхід може спричинити значні похибки при обчисленні дійсного значення  $T_{\text{спор}}$ . В роботі [4] запропоновано підхід, який полягає у чисельному інтегруванні залежності (1) і враховує залежність коефіцієнта загального опору системи  $\zeta_c$  від числа Рейнольдса  $Re$ , а отже, дає змогу отримати дійсне значення швидкості витікання  $V$ . При цьому достовірні результати отримують для конкретних умов шляхом проведення імітаційного експерименту.

Беручи до уваги особливості режимів функціонування систем аварійного зливу, досі їх проектування та експлуатація не розглядаються сумісно, як єдина система. Поряд з цим до сучасного виробництва ставиться ряд важливих умов, однією з яких є "гнучкість" технології. В процесі зміни технології може змінюватись вид горючої рідини, її реологічні властивості. При цьому виникає необхідність розв'язання оберненої задачі, при якій за заданими конструктивними параметрами системи визначають час  $T_{\text{спор}}$ , який може перевищувати допустимий, що викликає необхідність реконструкції системи аварійного зливу. Таким чином, вже на стадії проектування має ставитися умова "обмеження" за часом, яка забезпечить максимальну адаптацію системи до умов реконструкції та надасть можливість спрогнозувати режим її функціонування після реконструкції.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є прогнозування гідравлічної поведінки системи аварійного зливу при течії аномально в'язких рідин і надання рекомендацій щодо уточненого розрахунку цих систем. Якісна картина течії розглядалась на прикладі нафти Щурівського родовища (Сумська область, Україна).

#### Виклад основного матеріалу.

**Реологічні особливості поведінки нафти.** Обробка даних експериментальних досліджень [5] з визначення залежності напружень зсуву  $\tau$  від градієнта швидкості  $\gamma$  (рис. 1), дає змогу стверджувати, що реологічна поведінка нафти суттєво відрізняється від поведінки ньютонівських рідин.



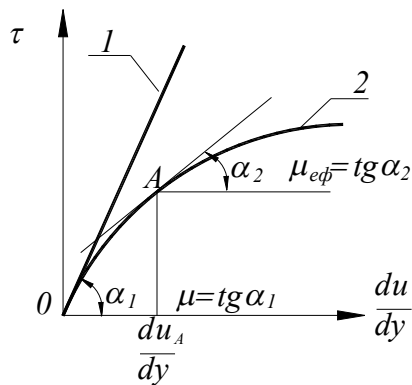
**Рис. 1.** Залежність напруження зсуву  $\tau$  від градієнта швидкості  $\gamma$  для нафти Щурівського родовища

Рідини, для яких характерна представлена залежність дотичних напружень від швидкості зсуву відносяться до степеневих і їх реологічна поведінка може бути описана законом Освальда де Віля [6]:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n, \quad (2)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву,  $K$  – консистентна стала;  $\frac{du}{dy} = \gamma$  – градієнт швидкості,  $n$  – індекс течії (для псевдопластичних рідин  $n < 1$ ).

Доцільність використання закону Освальда де Віля в залежностях для гідравлічного розрахунку систем аварійного зливу видно з рис. 2. Так для ньютонівських рідин динамічна в'язкість  $\mu$ , яка використовується в існуючих методиках розрахунку цих систем, є сталою величиною і залежить тільки від температури (лінія 1 на рис. 2). При цьому  $\mu = \operatorname{tg} \alpha_1$ . Для псевдопластичних рідин можна було б використовувати ефективну в'язкість, але, як видно з рис. 2,  $\mu_{\text{еф}}$  залежить від швидкості зсуву  $\frac{du}{dy}$  (лінія 2 на рис. 2), а отже збільшується із зменшенням швидкості течії  $u$ , тобто при спорожненні системи. Наприклад, значенню градієнта швидкості  $\frac{du_A}{dy}$  (т. А на рис. 2) відповідає  $\mu_{\text{еф}} = \operatorname{tg} \alpha_2$ .



**Рис. 2.** Відмінності реологічної поведінки ньютонівської (1) та псевдопластичної (2) рідин

В табл. 1 наведені значення консистенції  $K$  та індексу течії  $n$  для даних, представлених на рис. 1.

Таблиця 1

Значення індексів течії та консистентних сталих для нафти Щурівського родовища

| № проби | Температура $t$ , °C | Консистентна стала $K$ , Па·с <sup>n</sup> | Індекс течії $n$ |
|---------|----------------------|--|------------------|
| 1       | 20                   | 0,685                                      | 0,71             |
|         | 30                   | 0,408                                      | 0,74             |
| 2       | 20                   | 1,234                                      | 0,67             |
|         | 30                   | 0,514                                      | 0,7              |

Варто відмітити, що із зміною температури змінюються значення консистентної постійної  $K$ , що і слід було очікувати, оскільки вона є аналогом в'язкості. З відомих літературних джерел відомо, що індекс течії для однорідних середовищ не залежить від температури. В нашому випадку незначну зміну значення індексу течії при зміні температури можна пояс-

нити похибкою вимірювань або тим, що нафта являє собою складну суміш вуглеводнів, які по різному реагують на зміну температури.

**Визначення втрат напору в комунікаціях системи аварійного зливу.** В основі гідравлічного розрахунку систем аварійного зливу лежить задача визначення втрат напору в мережі з'єднувальних трубопроводів. У цій роботі приділимо увагу визначенню втрат напору по довжині трубопроводної системи  $h_l$ , оскільки саме цей показник багато в чому визначає ефективність системи в цілому.

Втрати напору по довжині  $h_l$  визначаються за відомою у гідравліці формулою Дарсі-Вайсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (3)$$

де  $\lambda$  – гідравлічний коефіцієнт тертя;  $l, d$  – довжина та діаметр ділянки;  $V$  – середня швидкість руху рідини. Враховуючи реологічні особливості степеневих рідин коефіцієнт  $\lambda$  прийнято представляти залежно від числа Рейнольдса  $Re$ , а саме число  $Re$  представляти у вигляді [6]:

$$Re = \frac{2^{n+3} V^{2-n} \rho R^n}{K \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $R$  – радіус трубопроводу. При цьому для ламінарного режиму течії степеневих рідин при даній формі запису числа Рейнольдса зберігається відома залежність для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (5)$$

Для турбулентного режиму руху степеневих рідин, як і для ньютонівських, характерні три області гідравлічних опорів: гладкостінного, доквадратичного та квадратичного (умови зміни режимів течії для степеневих рідин розглянуто нижче). Так для області гладкостінного опору, яка має місце при  $Re_{кр} \leq Re \leq 100000$ :

$$\lambda = 4C_f, \quad (6)$$

де  $Re_{кр}$  – критичне число Рейнольдса;  $C_f$  – коефіцієнт опору тертю, який визначають за формулою [6]:

$$C_f = \frac{a}{Re^b} \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$  у формулі (7) наведені у таблиці 2 [6].

Таблиця 2

Співвідношення між  $n$  та параметрами  $a$  та  $b$

| $n$ | $a$    | $b$   | $n$ | $a$    | $b$   |
|-----|--------|-------|-----|--------|-------|
| 0,2 | 0,0646 | 0,349 | 0,8 | 0,0761 | 0,261 |
| 0,3 | 0,0685 | 0,325 | 1,0 | 0,0779 | 0,250 |
| 0,4 | 0,0712 | 0,307 | 1,4 | 0,0804 | 0,321 |
| 0,6 | 0,0740 | 0,281 | 2,0 | 0,0826 | 0,213 |

В зонах доквадратичного та квадратичного опору, які виникають при  $Re > 100000$ , за даними роботи [6] коефіцієнт опору тертю можна визначити з залежності:

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = \frac{4,0}{n^{0,75}} \lg[Re_m C_f]^{2-n} - \frac{0,4}{n^{1,2}}, \quad (8)$$

де  $Re_m = \frac{\rho V^{2-n} R^n}{2^{2n-3} K'}$  форма запису числа Рейнольдса, запропонована Метцнером та Рідом, де параметри  $n'$  та  $K'$  пов'язані з відповідними, які використовуються в реологічному законі Освальда де Віля такими співвідношеннями:

$$K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n, \quad (9)$$

$$n' = \frac{n}{1 - \frac{1}{3n'+1} \frac{d(n')}{d(\ln(\tau_{cm}))}}, \quad (10)$$

а напруження на стінці труби:

$$\tau_{ct} = K \left( \frac{3n+1}{n} \frac{Q}{\pi R^3} \right)^n. \quad (11)$$

**Критерій існування режиму руху течії степеневих рідин.** Питання щодо переходу ламінарного режиму в турбулентний для неньютонівських рідин не з'ясоване остаточно. Різними авторами запропоновано формули для визначення критичного числа Рейнольдса  $Re_{кр}$ , найбільш поширені з яких наведені в роботі [7].

Взагалі вважають, що ламінарний режим руху перестає існувати за умови, коли сили прискорення вихорів будуть близькими до деякого числа, яке кратне величині сил в'язкого тертя. Руан та Джонсон в якості критерію зміни режимів запропонували використовувати критерій  $Z$ , який записують у вигляді [6]:

$$Z = \rho \frac{|\text{grad}(\bar{U} \cdot \bar{U})|}{|\text{grad}(p)|}, \quad (12)$$

де  $\bar{U}$  – вектор швидкості;  $p$  – тиск.

Для одномірної течії в циліндричній трубці:

$$Z = \rho \frac{d(U_x^2)/dr}{dp/dx}. \quad (13)$$

Так для ньютонівської рідини було отримано, що максимальне значення критерію  $Z_{\max}$  знаходиться на відстані  $r = R/\sqrt{3}$  від осі трубопроводу. Беручи до уваги, що  $Re_{кр} = 2100 - 2320$  для критерію  $Z$  можна отримати його критичне значення

$Z_{кр}^* = 2100 \sqrt{\frac{4}{27}} \dots 2320 \sqrt{\frac{4}{27}} = 808 \dots 893$ . Для течії степеневі рідини максимальне значення

критерій  $Z$  приймає на відстані  $r = R \left( \frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n}{n+1}}$  від осі труби і визначається з залежності:

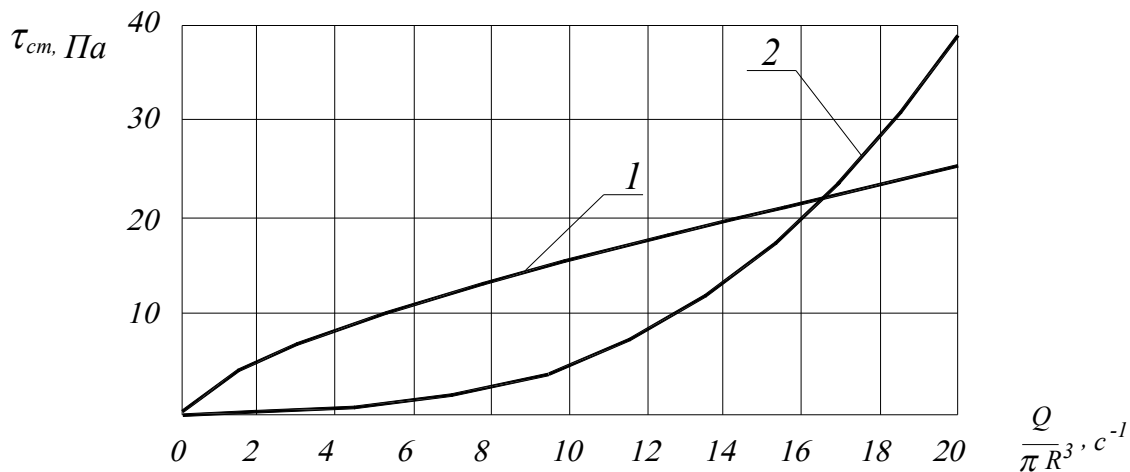
$$Z_{\max} = \frac{\rho R^2 (3n+1)^{2n}}{\tau_{cm} n} \left( \frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \left( \frac{Q}{\pi R^3} \right)^2. \quad (14)$$

При критичному значенні критерію  $Z_{кр} = 808$  дотичні напруження на стінці труби:

$$\tau_{ct,кр} = \frac{\rho R^2 (3n+1)^{2n}}{808 n} \left( \frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \left( \frac{Q}{\pi R^3} \right)^2. \quad (15)$$

В той же ж час, згідно з законом Гагена-Пуазейля напруження на стінці труби визначається за формулою (11).

Побудувавши графіки залежності  $\tau_{ст.кр}$  та  $\tau_{ст}$  від  $\frac{Q}{\pi R^3}$  можна отримати значення витрати, при якій відбудеться зміна режимів руху. Так нами отримано значення витрати  $Q$  при якій відбувається зміна режимів руху нафти проби №2 Щурівського родовища при  $t = 20$  °С в трубі діаметром  $d = 100$  мм (точка перетину кривих 1 та 2 на рис. 3).



**Рис. 3.** Залежність напруження зсуву  $\tau_{ст}$  на стінці труби від градієнта швидкості  $\frac{Q}{\pi R^3}$  для нафти проби №2 Щурівського родовища при  $t = 20$  °С (для кривої 1  $\tau_{ст}$  обчислено за формулою 15, для кривої 2  $\tau_{ст}$  обчислено за формулою 11)

Однак такий метод визначення умов зміни режимів руху є незручним. Тому нами з залежностей (4), (15) та (16) отримано наступний вираз для критичного значення числа Рейнольдса, який доцільно використовувати для течії степеневих рідин:

$$Re_{кр} = 6464 \frac{n^{n-1} (n+2)^{\frac{n+2}{n+1}}}{(3n+1)^{n+1}} \quad (17)$$

**Висновки.** На прикладі нафти Щурівського родовища показано, що течія рідин, які реологічно підлягають степеневому закону Освальда де Віля, є більш складною ніж течія ньютонівських рідин. В'язкість таких рідин є функція від швидкості руху і у випадку спорожнення технологічної посудини зростає. Запропоновано форму запису критичного числа Рейнольдса для степеневих рідин та вказано формули для обчислення гідравлічного коефіцієнта тертя. Ці особливості необхідно враховувати при проектуванні систем аварійного зливу.

#### Література:

1. **ВБН В 2,2-581-94** „Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насиченої пари не вище 93,3 кПа”.
2. **Алексеев М.В.** Пожарная профилактика технологических процессов и производств / М.В. Алексеев, О.М. Волков, Н.Ф. Шатров – Москва: // Высшая инженерно-техническая школа МВД СССР. – 1986. – 370 с.
3. **Справочник по гидравлике** / [под ред. В.А. Большакова]. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1984. – 343 с.

4. **Тесленко А.А.** Расчетные и проверочные алгоритмы определения параметров аварийного слива опасного вещества / Тесленко А.А., Бугаев А.Ю. // Проблемы пожарной безопасности – Харьков: НУГЗУ, 2012. – Вып. 31. – С. 207 – 211.

5. **Хоггас Башир.** Особенности течения вязких и аномально-вязких жидкостей в потоках, с изменяющимся по их длине расходом: дис. к. т. н.: 05.23.16 / Хоггас Башир. – К., 2012. – 168 с.

6. **Яхно О.М.** Гідравліка неньютонівських рідин / О.М. Яхно, В. І. Желяк. – Київ: Вища школа, 1995. – 194 с.

7. **Лещій Н.** Перехід від ламінарного до турбулентного режиму руху для чистов'язких степеневих рідин / Лещій Н., Желяк В. // Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація. Вісник НУ"ЛП" – Львів: НУ"ЛП", 2000. – №404. – С. 19 – 23.

*В.И. Желяк, А.Я. Резуш, А.В. Лазаренко*

### **УЧЕТ АНОМАЛИИ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО СЛИВА**

В статье рассмотрены особенности расчета систем аварийного слива нефти. Указано, что упрощения, которые принимают для расчета систем аварийного слива, приводят к значительным погрешностям подсчета времени опорожнения сосудов. Показана целесообразность использования закона Освальда де Вилля в зависимостях для гидравлического расчета систем аварийного слива. Учитывая эти особенности в работе приведены формулы для подсчета потерь напора по длине трубопровода и предложена формула для определения критического числа Рейнольдса для течения псевдопластических жидкостей.

**Ключевые слова:** системы аварийного слива, время опорожнения аппарата, псевдопластические жидкости, число Рейнольдса.

*V.I. Zhelyak, A.Y. Regush, A.V. Lazarenko*

### **INCORPORATION OF ANOMALIES LIQUID CALCULATION OF EMERGENCY IN PLUMS**

The article discusses the features of calculation of an emergency discharge of oil. Stated that the simplifications that take to calculate the accidental discharge systems, lead to significant errors of counting time emptying. The expediency of using the law of Oswald de Ville in the dependencies for the hydraulic calculation system accidental discharge. Given these features in the formulas for calculating the pressure drop along the length of the pipeline and proposed a formula for determining the critical Reynolds number for the flow of pseudo plastic fluids.

**Keywords:** systems of emergency drain emptying time machine, pseudo plastic fluid Reynolds number.

