

*С. В. Рудаков, к.т.н., доцент, доц. каф., НУЦЗУ,  
О. В. Миргород, к.т.н., доцент, доц. каф., НУЦЗУ*

## **ВПЛИВ ХВИЛІ ПРОРИВУ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ ПРИ РУЙНУВАННІ РЕЗЕРВУАРІВ З НАФТОЮ НА ЛЮДЕЙ, БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ**

(представлено д.т.н. Ключкою Ю. П.)

В роботі розглянутий вплив небезпечних факторів при квазімиттєвому руйнуванні РВС (хвиля прориву, теплове випромінювання) який проявляється за лічені секунди. Цього часу явно недостатньо для ідентифікації персоналом об'єкта аварійної ситуації і, як наслідок, прийняття заходів для власної безпеки і, тим більше, відповідних дій щодо запобігання розливу рідини, що горить.

**Ключові слова:** пожежна безпека, резервуари з нафтою, хвиля прориву.

**Постановка проблеми.** Основною спрямованістю сучасних підходів до забезпечення пожежної безпеки, що базуються на концепції «прийнятної ризику», є зниження ймовірності загибелі людей. Це передбачає виконання комплексу робіт, пов'язаних з аналізом ризику можливих аварій, при цьому питання наукової обґрунтованості і адекватності розрахункових методик є одним з ключових в забезпеченні безпеки людей.

Однак, незважаючи на підвищену увагу дослідників до цієї проблеми, відсутні методи оцінки небезпечних факторів, динаміки розвитку і прогнозу наслідків аварійної ситуації, пов'язаної з квазімиттєвим руйнуванням вертикального сталевого резервуару з нафтопродуктами (далі РВС або нафтовий резервуар).

Відрізняючими ознаками такої аварії є повна втрата цілісності корпусу РВС і вихід протягом короткого проміжку часу (не більше 10-15 с) на прилеглу територію всієї рідини, яка зберігається в резервуарі, у вигляді потужного потоку – хвильового прориву. При цьому хвиля характеризується різкою нестационарністю, наявністю фронту у вигляді бору (валу), який рухається зі значною швидкістю і володіє великою руйнівною силою [1–2].

Тому слід зазначити, що до основних споруд за обмеженням аварійного розливу рідин в резервуарних парках протягом останніх ста років відносяться земляні обвалування або огорожувальні стіни, розрахунок яких проводиться тільки на гідростатичному утриманні пролітої рідини [3]. Але ці споруди не виконують своє призначення у повному обсязі. Тому стає проблема розробити таку огорожувальну конструкцію, яка б мінімізувала вплив хвилі прориву горючої рідини при руйнуванні резервуарів з нафтопродуктами на людей та будівлі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В результаті аналізу

нормативних документів по оцінці пожежного ризику на виробничих об'єктах [4, 5] виявлено, що хвиля прориву не розглядається в якості небезпечного фактора аварійної ситуації, при цьому відсутні дані як з частоти руйнувань РВС, так і за статистичними можливостям реалізації сценаріїв розвитку даної аварійної ситуації. Крім того, не наводяться методи оцінки форми площі протоки рідини при руйнуванні РВС, а також параметрів впливу хвилі прриву на людей і протипожежні перешкоди, що не дозволяє зробити кількісний аналіз пожежного ризику при квазі-миттєвому руйнуванні РВС.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є розвиток методів оцінки та засобів зниження пожежного ризику при квазі-миттєвому руйнуванні нафтових резервуарів та сформулювати принципи розробки огорож РВС для повного утримання хвилі прориву, на підставі яких запропонований варіант конструктивного виконання перешкоди – захисної стіни з хвильовідбивним навісом.

Відрізняючими ознаками руйнування РВС є повна втрата цілісності корпусу і вихід протягом короткого проміжку часу (не більше 10–15 с) на прилеглу територію всієї рідини, яка зберігається в резервуарі, у вигляді потужного потоку – хвильового прориву. При цьому хвиля характеризується різкою нестаціонарністю, наявністю фронту у вигляді бору (валу), який рухається зі значною швидкістю і володіє великою руйнівною силою. Тому слід зазначити, що до основних споруд за обмеженням аварійного розливу рідин в резервуарних парках протягом останніх ста років відносяться земляні обвалування або огорожувальні стіни, розрахунок яких проводиться тільки на гідростатичному утриманні пролітої рідини [3]. Аналіз наслідків руйнувань РВС, переконливо свідчить про те, що такі перешкоди не здатні утримати потік, що рухається за законами гідродинаміки, в результаті чого подібні аварії неодноразово приводили до травм і загибелі людей, значних матеріальних і екологічних збитків [4, 5].

При повному розкритті стінок резервуара порушується початковий стан рідини, яка зберігається в ньому: змінюються в часі параметри руху в окремих точках простору, зайнятого рідиною, що рухається, внаслідок чого виникає несталий рух в відкритому руслі. У відкритих руслах несталий рух супроводжується змінними, як в часі, так і по довжині русла швидкостями, глибинами, витратами, площами живого перетину потоку і іншими характеристиками. Зміна параметрів руху рідини, в свою чергу, є наслідками переміщення вниз за течією хвилі прориву. Внаслідок різкої зміни глибини потоку на короткій відстані (розглядається відстань від резервуара до захисної огорожі або до сусідніх резервуарів в групі) рух рідини буде швидко змінюватися, а хвиля прориву стане перервною хвилею, для якої властиве наявність фронту у вигляді валу, який рухається з великою швидкістю і володіє великою руйнівною силою [6].

Вертикальний компонент прискорення хвилі прориву грає тут зна-

чну роль, так як впливом тертя в каналі практично можна знехтувати в порівнянні з динамічним ефектом руху потоку.

Характерними особливостями цього виду рухання є:

- кривизна потоку, яка виражена настільки різко, що розподіл тиску не може бути прийнято гідростатичним;
- швидка зміна режиму потоку відбувається на відносно короткій ділянці, тому граничне тертя дуже мале;
- при виникненні швидкої зміни руху в різких перехідних спорудах фізичні характеристики потоку визначаються в основному геометрією меж споруди і станом потоку.

Однак форма руху хвилі нестійка, і якщо на початку профіль хвилі характеризується крутим фронтом, то в міру просування хвилі по сухому руслу він швидко распластується. При необмеженій ширині відвідного русла виникає вільне розтікання, на зовнішніх кордонах якого глибина прагне до нуля. У реальних умовах при обмеженій ширині відвідного русла бурхливий потік набігає на берега огорожі відвідного русла і руйнує їх.

Такий рух має складну фізичну природу. Він не описується будь-якою системою диференціальних рівнянь, яка є адекватною в часі на всіх ділянках розглянутого процесу. Для розуміння його провідних факторів, які в той чи інший відрізок часу керують процесом на тій чи іншій ділянці, ці фактори виокремлюють, абстрагують від інших, менш суттєвих, і для досліджуваної ділянки будують, можливо, більш просту математичну модель, яка враховує лише виокремлені фактори. У рішення таких локальних завдань вводять необхідні поправки, які враховують другорядні фактори, які впливають на вирішення поставленого завдання.

Основним способом вирішення завдання, пов'язаного з утворенням хвилі прориву при раптовому руйнуванні водосховища і поширенням її в широкому прямокутному руслі з постійним ухилом, існують методи обчислювальної гідравліки, що використовують диференціальні рівняння Сен-Венана [7] вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \partial \left( \frac{q^2}{h} + gh^2 \right) - ghI + \frac{\lambda}{2} g^2 = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $h$  – глибина потоку;  $q$  – витрата на одиницю ширини;  $g = g/h$  – швидкість течії;  $I$  – ухил дна русла;  $t$  – час;  $x$  – просторова змінна;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя.

Рівняння (1), в даному випадку, приведені до вигляду законів збереження маси та імпульсу. Така форма запису рівнянь дозволяє вважати узагальненими рішеннями системи такі рішення, що задовольняють відповідним законам збереження в інтегральній формі і включають гідравлічні стрибки.



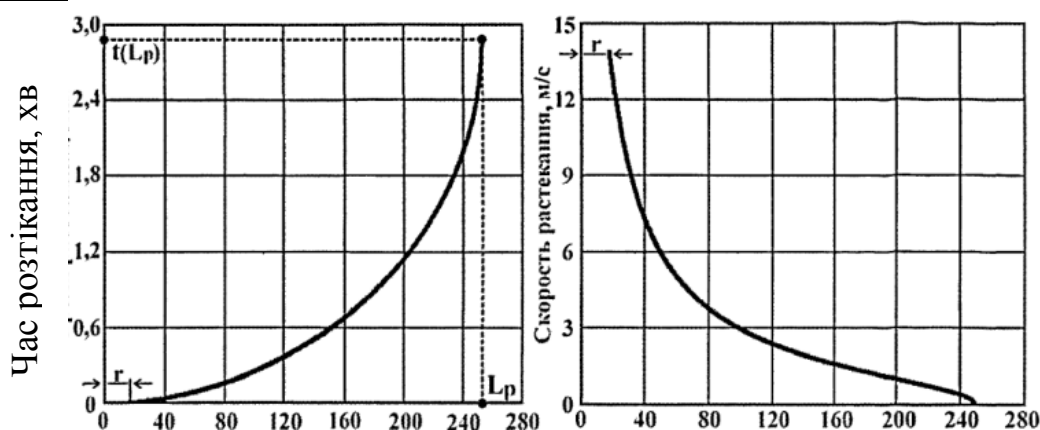


Рис. 2. Номограми зміни часу та швидкості гідродинамічної хвилі прориву

Таким чином, стосовно до задачі дослідження виникнення хвилі прориву при руйнуванні РВС, її поширення і впливу на людей, будівлі і споруди, в тому числі захисні перешкоди, результати раніше проведених теоретичних досліджень є явно недостатнім. Це потребує розробки математичної моделі, адекватної досліджуваному процесу, її чисельного рішення і підтвердження отримання даних результатами лабораторних і натурних експериментів.

Процеси утворення хвилі прориву при квазімиттєвому руйнуванні РВС, їх поширення і вплив на перешкоди є небезпечною техногенною подією, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей, призведе до руйнування будівель, споруд, обладнання та комунікацій, порушення виробничих і транспортних процесів, нанесення шкоди навколишньому природному середовищу. Тому необхідно визначити показники силового впливу хвилі прориву на людей, будівлі і споруди при гідродинамічних аваріях на різних об'єктах. Показник наслідків силового впливу хвилі прориву на людину визначається кількістю людей, які постійно або тимчасово знаходяться в зоні впливу хвилі прориву, значення параметрів якої перевищують критичні значення для життя і здоров'я людини. В якості критичного значення параметру хвилі прориву може бути прийнята, наприклад, глибина потоку в зоні розтікання або параметр потоку, що призводить до руйнування будівель і споруд, в яких знаходяться люди. Показник силового впливу хвилі прориву на будівлі і споруди визначається міцнісними характеристиками будівель і споруд, а також параметрами хвилі прориву (гідродинамічний тиск, швидкість, глибина потоку).

Приймається також критерій поділу зони затоплення (максимальне значення параметрів аварії): зони сильних, середніх і слабких руйнувань для об'єктів транспорту і ліній зв'язку. Ступінь руйнування (втрата залишкової балансової вартості) по зонах приймається наступна: зона сильних руйнувань – 0,8; зона середніх руйнувань – 0,4; зона слабких руйнувань – 0,1. Критерії поділу зони затоплення (максимальне значення параметрів гідродинамічної аварії) на зони сильних, середніх і слабких руйнувань для об'єктів житлового фонду та майна громадян.

Ступінь руйнування будівель і споруд в першу чергу визначається максимальною питомою (на одиницю ширини) енергією потоку ( $P$ ,  $\text{кг/с}^2$ ). При ви-

значенні екологічних збитків суттєвими є глибина і час затоплення території. При оцінці можливих людських втрат важним фактором (крім перелічених) є час добігання хвилі прориву до того чи іншого населеного пункту. Точність прогнозування ймовірного шкоди безпосередньо пов'язана з точністю прогнозування гідродинамічних параметрів хвилі прориву, яка визначається:

- а) вибором сценаріїв руйнування гідротехнічних споруд;
- б) точністю розрахунку поширення хвилі прориву.

Для визначення ймовірного шкоди в результаті проходження хвилі прориву необхідно визначити наступні параметри:

- ступінь можливих руйнувань (наприклад, в балах);
- границі зони аварійного затоплення;
- максимальні значення глибини і швидкості потоку в зоні катастрофічного затоплення;
- час від початку аварії до приходу в дану точку місцевості проривної хвилі (час добігання);
- тривалість затоплення.

За результатами розрахунку хвилі прориву на топографічних картах місцевості заданого масштабу повинні бути нанесені наступні параметри:

- максимальні глибини затоплення в метрах (карта глибин затоплення);
- максимальні модулі швидкості течії в м / с (карта швидкостей);
- тривалість затоплення в добі (карта часів затоплення);
- час добігання фронту хвилі прориву в годинах (карта часів добігання);
- ступінь можливих руйнувань в балах (карта можливих руйнувань);
- інтенсивність впливу на населення в зонах (карта зон впливу на населення).

Таким чином, для побудови полів впливу хвилі прориву, що утворюється при руйнуванні РВС, на людей, будівлі і споруди, необхідно використовувати наступні висновки:

До основних параметрів потоку по трасі розтікання, які підлягають визначенню, слід віднести висоту і швидкість хвилі прориву, а також час її добігання до об'єкту впливу; гідродинамічні параметри хвилі прориву слід визначати на основі рішень двумерних або трохмерних рівнянь Сен-Венана чисельними методами; в якості критерію впливу хвилі прориву на людей, будівлі і споруди може використовуватися значення величини питомої енергії потоку в кожній точці зони затоплення. За результатами аналізу теоретичних і експериментальних досліджень хвилі прориву при руйнуванні гідротехнічних споруд, а також методик розрахунку максимальних параметрів потоку по трасі розтікання при гідродинамічних аваріях, приймаємо наступні припущення:

- розрахунок основних параметрів хвилі прориву ( $U_{en}$ ,  $P$ ) по трасі розтікання проводився для глибинні шари рідини  $H_{en} > 0,25$  м. ;
- основні параметри РВС  $D_p$ ;  $H_p$  - висота стінки РВС, м) з номінальним об'ємом 700, 5000, 10000, 20000, 30000 і 50000 м<sup>3</sup> прийнятно відповідно до рекомендацій;
- ступінь заповнення резервуарів рідиною (водою) прийнята рівною 0,95;
- траса розтікання рідини в зоні затоплення мала ухил  $i < 0,015$ .

Крім цього, з метою дотримання умов максимально наближених до реальних, при моделюванні враховують наступні фактори (рис. 3):

– висота фундаментів РВС ( $h_{\phi}$ ) над рівнем нульової відмітки прийнята:

для РВС 700-5000 м<sup>3</sup> - 0,5 м; для РВС 10000-50000 м<sup>3</sup> - 1,0 м;

– відстань від стінки РВС до обвалування ( $l_1$ ) прийнята:

для РВС 700-5000 м<sup>3</sup> - 6 м; для РВС 10000-50000 м<sup>3</sup> - 15 м;

ширина ( $l_2$ ) і висота ( $h_{об}$ ) обвалування при куті укосів в 45° прийняті рівними: для РВС 700-5000 м<sup>3</sup> -  $l_2 = 3,5$  м;  $h_{об} = 1,5$  м; для РВС 10000-50000 м<sup>3</sup> -  $l_2 = 5,0$  м;  $h_{об} = 2,0$  м; відстань ( $l_3$ ) від обвалування до дорожнього полотна дорівнює 5,0 м; ширина ( $l_4$ ) і висота ( $h_{д}$ ) дорожнього полотна дорівнює 6,0 і 0,3 м, відповідно.

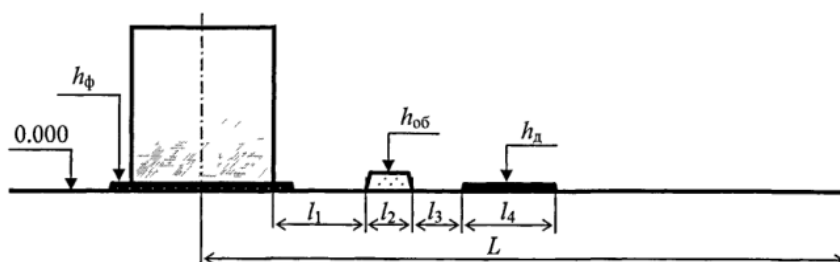


Рис. 3. Принципова схема до вибору вихідних даних для розрахунку параметрів хвилі прориву при руйнуванні РВС

На рис. 4 та 5 наведені результати розрахунків, які були отримані при вирішенні задачі про руйнування типових РВС [7] у відображенні типових кривих, які визначають висоту хвилі прориву та швидкість хвилі прориву по трасі розтікання.

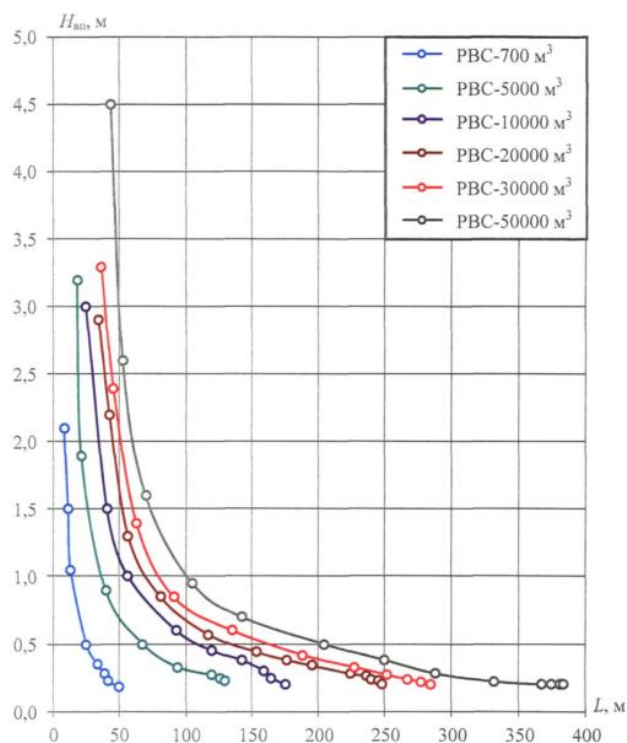


Рис. 4. Графічне відображення типових кривих, які визначають висоту хвилі прориву по трасі розтікання при руйнуванні типових РВС

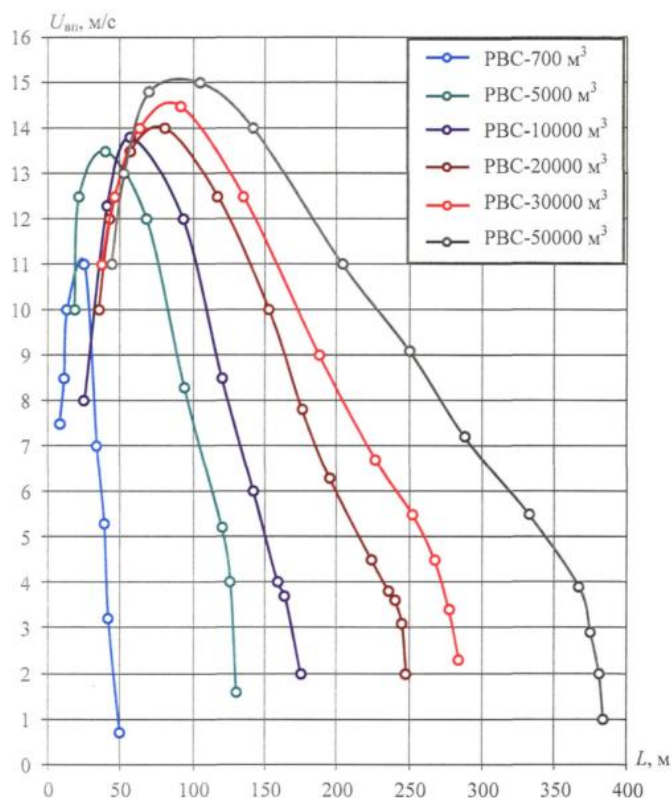


Рис. 5. Графічне відображення типових кривих, які визначають швидкість хвилі прориву по трасі розтікання при руйнуванні типових РВС

**Висновки.** Проведений натурний експеримент по квазімиттєвому руйнуванні РВС-700 м<sup>3</sup> з водою, на підставі аналізу результатів якого визначений механізм формування та руху потоку рідини, а також взаємодія з нормативним обвалуванням.

Запропонований принцип розробки огорожі РВС для стримання хвилі прориву, на підставі якого розроблений варіант конструктивного виконання перешкоди – огорожувальна стіна з хвильовідбивним навісом.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лебедева Л. Н., Лурье М. В., Швырков А. Н. Лавинные выбросы при разрушении резервуаров с жидкостями. Инженерно-физический журнал. 1991. Т. 61. № 5. С. 726–731.
2. Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М. Расчет влияния обвалования на растекание горючей жидкости при разрушении резервуара. Химическая промышленность. № 4. 1994. С. 230–233.
3. ВБН В. 2.2.-58.1-94. Проектування складів нафти та нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа.
4. Швырков С. А., Дедовец С. А., Ушаков С. Н. Оценка площади загрязнения территории жидкими углеводородами. Газовая промышленность. 2008. № 619 (спецвыпуск). С. 14–16.
5. Швырков С. А., Батманов С. В., Ушаков С. Н. Метод оценки площади загрязнения территории нефтью и нефтепродуктами при раз-



рушении резервуаров. Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям. Тезисы докладов I Всероссийской научн. практ. конф. с международным участием М.: МГУ им. М. В. Ломоносова. МАКС Пресс. 2008. С. 285–287.

6. Бетчелор Дж. Введение в динамику жидкости: пер. с англ. / Дж. Бетчелор. М.: Мир, 1973, 760 с.

7. Швирков С. А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2013. 355 с.

С. В. Рудаков, О. В. Миргород

**Влияние волны прорыва горючей жидкости при разрушении резервуаров с нефтью на людей, здания и сооружения**

В работе рассмотрено влияние опасных факторов при квазимгновенном разрушении РВС (волна прорыва, тепловое излучение) проявляется за считанные секунды. Этого времени недостаточно для идентификации персоналом объекта аварийной ситуации и, как следствие, принятие мер для собственной безопасности и тем более, соответствующих действий для предотвращения разлива горючей жидкости.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, резервуар с нефтью, волна прорыва.

S. Rudakov, O. Myrgorod

**Influence of the wave of the breakthrough of a combustible liquid during the destruction of oil reservoirs on people, buildings and structures**

The paper considers the influence of hazardous factors in the case of quasi-instant destruction of the VST (breakthrough wave, thermal radiation) manifests itself in a matter of seconds. This time is not enough for the personnel to identify the emergency object and, as a consequence, take measures for their own safety and, moreover, appropriate actions to prevent the spill of flammable liquid.

**Keywords:** fire safety, oil tank, breakout wave.