

А. М. Толкачов<sup>1</sup>, О. В. Третьяков<sup>2</sup>, С. В. Гарбуз<sup>3</sup>, О. М. Роянов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна

<sup>2</sup> Харківська державна академія фізичної культури, Харків, Україна

<sup>3</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ШВИДКОЇ ЛІКВІДАЦІЇ ЛЬОДЯНИХ ЗАТОРІВ НА РІКАХ

**Анотація. Актуальність.** У статті показано, що саме імпульсний викид води можна розглядати при створенні водомету для руйнування льодової криги з великою дальністю дії. Проведеними випробуваннями викидів води з великою швидкістю, більше ніж декілька десятків метрів за секунду, встановлено, що викиди відбуваються у вигляді дисперсної струї, яка швидко розпилюється. Основним дестабілізуючим фактором струї, який запускає зовнішні механізми її руйнування є турбулентність. Боротьба з турбулентністю шляхом забезпечення більш плавної течії біля стінок каналу і сопла зміщують початок процесу турбулентності, але не усувають її. Таким чином, традиційні гідродинамічні підходи не дозволяють суттєво впливати на турбулентність. **Метою даної роботи** є теоретичне обґрунтування способу швидкого руйнування льодових заторів на річках в період льодоходу. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання**: розробка теоретичного обґрунтування руйнування льодової криги за допомогою дискретного струменю великої швидкості; оцінка оптимальних параметрів струменю за допомогою комп'ютерного моделювання; визначення основних параметрів пристрою з кількісною оцінкою можливості руйнування пластів льоду різних габаритів. **Висновок.** Проведено теоретичне обґрунтування способу швидкого руйнування льодових заторів на річках в період льодоходу, зроблена оцінка оптимальних параметрів струменю води за допомогою комп'ютерного моделювання, визначено основні параметри пристрою з кількісною оцінкою можливості руйнування пластів льоду різних габаритів.

**Ключові слова:** річка, льодові затори, руйнування криги, струмінь великої швидкості.

### Вступ

Затор льоду – явище льодового режиму річки в період замерзання, що позначається нагромадженням крижин під час льодоходу в вузьких місцях. Буває найчастіше під час весняного льодоходу, але відмічається і восени. Часто буває причиною льодоставу. При заторі, як і при зажорі, вище по течії, від місця його утворення спостерігається підйом, а нижче – зниження рівня води [1].

На території України знаходиться значна кількість річок, на яких щороку у весняний період спостерігається небезпечне явище – затори льоду, що становить чималу загрозу руйнування опор мостів, підтоплення прилеглих територій і потребує постійної уваги та протидії з боку гідрологічних служб, підрозділів ДСНС. Причинами даної ситуації являється географічне розташування держави, та холодний клімат у зимовий період року.

Дія льоду на опори, якщо не прийняті відповідні міри захисту, мають прояв у відриванні елементів опор від основи (грунту) при підвищенні рівня льоду, у розпиранні опор вздовж вісі мосту при розширенні льоду під впливом різкої зміни температури, у тиску на опори при рухах льоду, а також від льодин, що зупиняються і накопичують перед спорудами при заторах, у стиранні та ударах льодин, що пливають при льодоходах.

Саме така ситуація трапилася 6 квітня 2018 року Під масою криги на річці Псел у місті Гадячі, що розташовано на Полтавщині, відбулася загроза руйнування мосту, надзвичайну ситуацію вдалося уникнути за допомогою бійців ДСНС та дорожників [2].

Підвищення рівню льоду загрожує витягуванням палів й руйнуванням стиків в них, руйнуванням

раджів. Вертикальний і горизонтальний вздовж осей мосту вплив льодового покриву, особливо небезпечний для дерев'яних опор, необхідно запобігати руйнуванням льоду навколо опор[3].

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** З метою проведення запобіжних заходів на річках України, особливо великих і поточних з півдня на північ, практикується проведення дослідження ситуації та аналіз ризиків, забезпечується постійне спостереження за рухом льоду на початку замерзання або під час танення річок і приймаються рішення на проведення завчасних попереджувальних заходів й застосування методів штучного ослаблення крижаного покриву ділянок річок [4].

При ускладненні обстановки, зазвичай у разі неочікуваного утворення затору в небажаному місці або потужного забиття льодом частини живого перетину річки завдяки збігу несприятливих обставин, негайно вживаються міри по дробленню льоду в місцях можливого утворення льодових пробок [5] із застосуванням механічних і вибухових методів [6].

Проведення попереджувальних робіт по дробленню льоду в містах вірогідного виникнення заторів виконується за умов достатньої кількості часу групами піротехніків з виходом на кригу. При цьому використовується занурення у воду зарядів, для яких попередньо свердлять лунки.

Застосування в практиці вищенаведених методів у боротьбі із заторними явищами при катастрофічних наслідках можливе окремо і в комплексі з використанням авіації.

Авіація може використовуватися за трьома напрямками:

- повітряна розвідка льодової обстановки уздовж річки шляхом візуального спостереження й із

застосуванням аерофотознімання. Як правило, для оперативного з'ясування гідрогеологами льодової обстановки на річках на значній відстані доцільно використовувати легкомоторну (малу) авіацію і вертольоти з підготовленими екіпажами. Картограма повітряної розвідки льоду (складена на основі схеми або великомасштабної карти річки) є одним з основних оперативних документів при визначенні найбільш дієвих заходів боротьби із заторами;

- доставка в заторні райони фахівців, устаткування і матеріалів, необхідних для проведення робіт; також – мала авіація і вертольоти;

- дистанційне руйнування і запобігання утворенню льодових заторів шляхом їх бомбардування з повітря (бомбардувальна авіація) і підірванням зарядів й інших інженерних боєприпасів [7] або вібрацією [8], що збуджується хвилепродуктором (з використанням літаків і вертольотів).

Проте авіаційне бомбометання малоефективне через труднощі прицільного попадання у найбільш напружені зони затору, малу кількість бомб в одному вильоті та їх підрив на великій глибині й вельми високу вартість вильоту. Цей метод слід застосовувати у виняткових випадках, коли всі інші заходи вичерпані, при катастрофічних підйомах заторного рівня і неможливості вжити інших заходів в короткі терміни.

Так у березні 2018 року в місті Семей, що розташовано у східному Казахстані, під час підриву льоду на річці Іртиш вибуховою хвилею було зруйновано вікна у багатопверхових будинках, також було зафіксовано звернення громадян до медичного закладу [9].

Разом з цим великий успіх з руйнування різноманітних твердих матеріалів мають імпульсні технології на основі відповідних водометів [10]. Вони забезпечують велику кінетичну енергію води, у виробках з пороховим зарядом – гідро пушках швидкість струї досягає 1500 м/с [11], що дозволяє руйнувати практично будь-які тверді матеріали.

У запропонованому методі струмінь складається з окремих порцій води, то б то є дискретним, що забезпечує використання потужності на забезпечення кінетичної енергії окремих порцій. Саме невелика її маса дозволяє створити таку величезну швидкість руху окремої порції води. Довжину компактної ділянки дискретної порції розглядають як ефективну довжину струменю, вона зазвичай становить 1,5 м.

Таким чином, саме імпульсний викид води можна розглядати при створенні водомету для руйнування льодової криги з великою дальністю дії. Це потребує суттєвого теоретичного обґрунтування застосування цього методу для руйнування льодової криги, пошуку оптимальних параметрів струменю за допомогою комп'ютерного моделювання та визначення основних параметрів пристрою з кількісною оцінкою можливості руйнування пластів льоду різних габаритів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування способу швидкого руйнування льодових заторів на річках в період льодоходу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- розробка теоретичного обґрунтування руйнування льодової криги за допомогою дискретного струменю великої швидкості;

- оцінка оптимальних параметрів струменю за допомогою комп'ютерного моделювання;

- визначення основних параметрів пристрою з кількісною оцінкою можливості руйнування пластів льоду різних габаритів.

## 1. Обґрунтування вибору методики

Витікання води з сопла відбувається зі швидкістю більшою ніж гранична швидкість ламінарної течії.

Режим течії визначається критерієм Рейнольдса – число, яке характеризує співвідношення сили інерції і сили в'язкості:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (1)$$

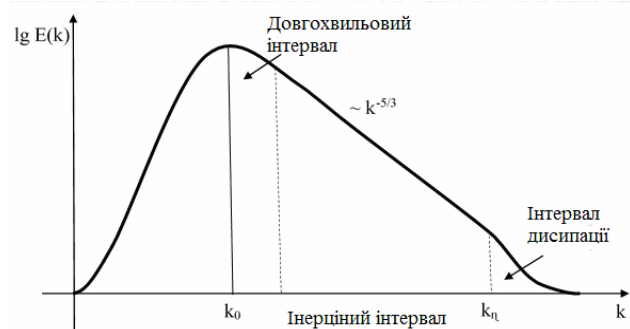
де  $u$  – характерна швидкість потоку,  $L$  – характерний розмір потоку,  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Проведеними раніше випробуваннями викидів води з великою швидкістю, більше ніж декілька десятків метрів за секунду, що характеризується великими значеннями  $Re \gg 2300$ , встановлено, що викиди відбуваються у вигляді дисперсної струї, яка швидко розпилюється [12].

Основним дестабілізуючим фактором струї, який запускає зовнішні механізми її руйнування є турбулентність. Боротьба з турбулентністю шляхом забезпечення більш плавної течії біля стінок каналу і сопла зміщують початок процесу турбулентності, але не усувають її.

Таким чином, традиційні гідродинамічні підходи не дозволяють суттєво впливати на турбулентність, наприклад, перешкоджати розвитку сильної турбулентності за допомогою штучно створеної дрібномасштабної (ДМ) турбулентності. Її значення для стабілізації струї обговорювалось у роботі [13].

Фактично спектральна залежність спектральної щільності енергії  $E(k)$  пояснює існування потоку турбулентної енергії (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність спектральної енергії  $E(k)$  від хвильових чисел  $k$  у логарифмічному масштабі:  $k_0$  і  $k_n$  – хвильові числа для максимуму енергії і на початку дисипації

Начальний інтервал спектру з малими  $k$  відноситься до процесів утворення крупно масштабної (КМ) турбулентності за рахунок енергії основного потоку. Максимальне значення енергії відповідає хвильовому числу  $k_0$ . Далі спектральні значення енергії знижуються, і виникає потік енергії до турбулентним утворенням меншого масштабу. Підсумкове перетворення кінетичної енергії у тепло відбувається із середньою швидкістю дисипації енергії  $\varepsilon$  в області значень великих  $k_n$ . Відповідно до моделі Колмогорова в інтервалі  $k_0 < k_i < k_n$  енергетичного спектру має місце так званий закон  $-5/3$ :

$$E(k) \approx \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3}. \quad (2)$$

Присутність у спектрі тільки однієї характерної величини – енергії дисипації  $\varepsilon$  означає, що перенос енергії ДМ турбулентними флуктуаціями не залежить від сили тертя, а визначається виключно силами інерції. Інтервал значень  $k_i$ , при яких виконується закон  $-5/3$ , зветься інерційним інтервалом спектру  $E(k)$ , його ширина тим більше, чим більше число Рейнольдса. Таким чином, відповідно до теоретичної моделі у гіпотетичній течії з обуреннями, які мають хвильові числа  $k_i > k_0$ , КМ турбулентні структури зароджуватися не можуть.

Простота моделі Колмогорова тільки здається, вона має фундаментальне значення для дослідження турбулентних течій. Її наслідки у вигляді закону  $-5/3$  підтверджені багато чисельними експериментальними дослідженнями і тим самим зміцнили теоретичні уявлення локально ізотропної турбулентності. Таким чином, є обґрунтованим застосування властивостей масиву ДМ флуктуації до турбулентної течії з великими числами Рейнольдса.

Виходячи з неможливості вихроутворення у середовищі з ДМ флуктуаціями, уявляється можливим використання її для стабілізації потоку. У роботі розглядається теоретичне обґрунтування створення штучної течії в режимі ДМ турбулентності з метою виведення її струї, де в процесі затухання ДМ флуктуацій буде відбуватися стримування вихроутворення.

## 2. Основні результати досліджень

Створення ДМ турбулентності базується на каскадному процесі передачі енергії Ричардсона і цей процес добре відпрацьований. Використовується течія, яка пройшла активну стадію турбулентності і знаходиться у стані турбулентних флуктуацій зі значеннями хвильових чисел  $k_i$ , які перебувають в інерційному інтервалі енергетичного спектру. Необхідна турбулентна енергія вноситься у потік штучним створенням вихорів за допомогою решітки, що встановлена на шляху течії (рис. 2) [14].

З наведеного рисунку видно, що крупні вихори з відстанню зменшуються і в процесі затухання турбулентності зникають, переходять у невидимі ДМ флуктуації. Саме область течії з мнимою відсутністю турбулентності стала предметом інтересу багатьох дослідників. Вже на ранній стадії досліджень було встановлено, що турбулентність за решіткою на від-

станях  $30 \div 40 M$  (де  $M$  – розмір чарунки решітки), по багатьом своїм характеристикам наближається до однорідної та ізотропної турбулентності [15]. Причому для її існування потрібно щоб число Рейнольдса було досить великим (сотні тисяч) [15].

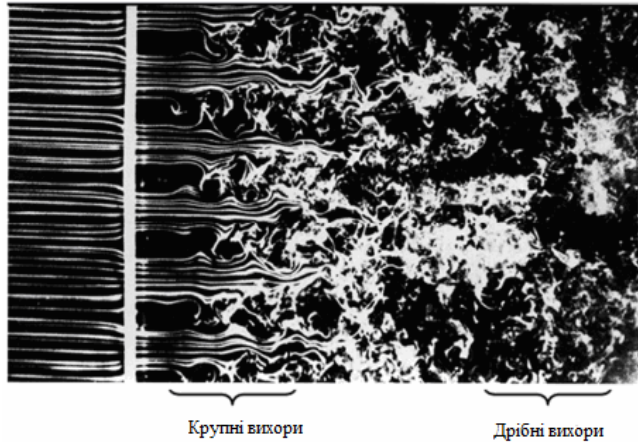


Рис. 2. Турбулентність у потоці за решіткою

Дослідження області розпаду турбулентності за допомогою решіток проведено різними методами. Найбільш ефективно створюють ДМ турбулентність решітки з просторовою системою фрактальних квадратів (рис. 3) [16].

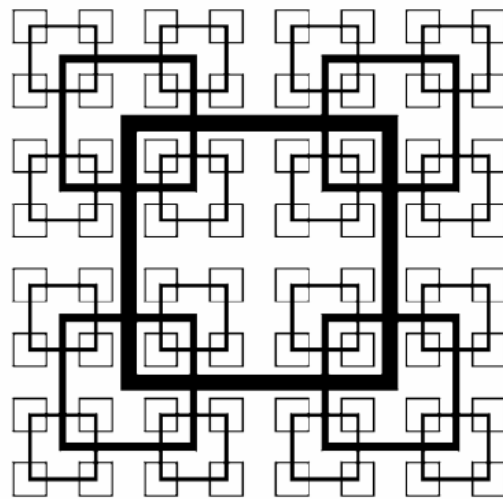


Рис. 3. Масштабна діаграма фрактальних квадратних решіток, заповнюючих простір

Для проектування водомету важливою є інформація про розподіл по потоку інтенсивності гомогенної ізотропної турбулентності [16]. Вона має максимум на відстані  $x_{peak}$  від і далі спадає експоненційно. Відповідно для складової по потоку середньоквадратичної турбулентної швидкості  $u'$  отримано вираз [16]:

$$u'^2 = u'_{peak}{}^2 \exp\left[-(x - x_{peak})/l_{urb}\right] \quad (3)$$

Встановлений характер розподілу локалізації інтенсивності решітчастої турбулентності дозволить виділити в течії область ДМ турбулентності. Безумовно ця задача не є простою, так як характеристи-

ки решітчастої турбулентності і саме значення  $x_{peak}$  є похідною від швидкості течії і параметрів решітки. Особливою задачею є отримання великої інтенсивності ДМ турбулентності в каналі течії, щоб вона зберігала активність у стані затухання в струї.

Процес формування струї повинен забезпечувати перенос енергії із встановленої області максимуму інтенсивності турбулентних флуктуацій у струю. Сумарна величина енергії в цій області залежить від інтегральної енергії по усій множині хвильових чисел інерційного інтервалу (вони повинні реалізуватися в обраних умовах турбулентної течії), а також від часових масштабів. Спектр хвильових чисел інерційного енергетичного інтервалу при великих числах Рейнольдса охоплює 2-3 порядки. Відповідно виникає знаний набір часових масштабів з актами турбулентних флуктуацій, які проходять безперервно. У результаті в області потоку поблизу  $x_{peak}$  існує локальний масив необхідних флуктуацій з ресурсом турбулентної кінетичної енергії, в якому йде тільки дисипативний процес. Таким чином, ця область потоку є безперервним генератором ДМ турбулентної енергії.

Частина цього масиву, що виведена у струю, буде перешкоджати утворенню в ній сильної турбулентності до вичерпання турбулентної енергії через дисипативний процес. У зв'язку з цим постає питання про середній час життя  $\tau$  імпульсу ДМ турбулентності, яка потрапила у струю. Оптимістичний прогноз з цього питання дозволяють зробити визначене у [17] швидке зростання  $\tau$  як функція числа Рейнольдса  $Re$ , практично як  $\ln \tau \sim Re$ . В подальших дослідженнях було встановлено, що залежність  $\tau$  є більш сильною – подвійно експонентною:  $\tau \sim \exp(\exp(Re))$  [18].

При передачі ДМ турбулентності із каналу течії в сопло і далі в струю виникає небезпека утворення вихорів через зміну режиму течії та різких змін перерізів потоку. Але течія з ДМ турбулентністю реагує на зовнішні дії інакше ніж ламінарний потік. В упорядкованому полі швидкостей ламінарної течії локальна флуктуація відразу ж порушує порядок в деякій найближчій області, а у випадку локально-ізотропної гомогенної турбулентності немає ніякого порядку. Середовище ДМ турбулентних флуктуацій можна розглядати як дрібно структурований еластичний континуум, для нього навіть використана назва «турбулентна рідина» [19].

В її полі швидкостей для утворення далекого порядку і появи вихорів необхідно значно більша напруга, ніж в будь-якій іншій течії. Крім того, швидкість турбулентного переносу і змішування на порядок вище швидкості молекулярного переносу імпульсу, тепла і речовини, тому релаксація виникаючих напруг, наприклад, на нерівностях стінок, буде відбуватися швидше ніж у ламінарному потоці. Можна вважати, що турбулентна рідина як би тече по прикордонному шару. Але існує критична напруга, при якій, наприклад, на уступі стінки утворюються вихори. Саме такі вихори досліджувалися у повністю розвиненій турбулентній течії [20]. Нажаль в цій роботі не досліджувався поріг напружен-

ня для утворення вихорів, а тільки процес їх еволюції і послаблення. Зникнення вихору у вигляді сліду є важливішим результатом цієї роботи, який вказує на усталеність течії з ДМ турбулентністю.

За допомогою одного з пакетів Розрахункової Гідродинаміки (CFD) було досліджено сталий потік води в пристрої для створення імпульсної струї.

Для числового експерименту була створена 3-х мірна модель внутрішнього каналу з решітками у вигляді листів з дрібною перфорацією ( $d = 2$  мм), коефіцієнт втрат визначався по емпіричній формулі [21] –  $\xi \approx 1,15$ , вхідний патрубок розташований по осі (рис. 4).

Робоче тіло – вода при температурі  $t = 20$  °C .

Граничними умовами встановлювався потік з об'ємними витратами води  $Q = 2,26$  л/с, що відповідало середній швидкості на перерізі сопла  $V_{cp} = 10$  м/с. У математичній моделі були використані рівняння гідродинаміки із замикаючими умовами турбулентності  $k-\varepsilon$  [22]. Ця модель двох параметрична, яка використовує усередненим параметрам енергію турбулентності  $k = 0,5(\tilde{v}_x^2 + \tilde{v}_y^2 + \tilde{v}_z^2)$

та енергію розсіювання  $\varepsilon = C_\mu \cdot k/\delta_s \cdot \tilde{V}_i$  – усереднена пульсація відхилення величини компоненти швидкості,  $C_\mu = 0,09$  – емпіричний коефіцієнт,  $\delta_s$  – масштаб турбулентності.

Найбільш зручною величиною, що характеризує турбулентність є інтенсивність –  $I = \tilde{V}_i / V_i$ .

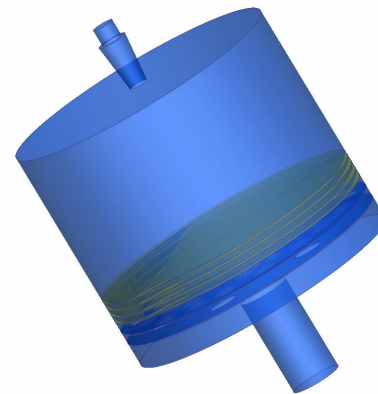


Рис. 4. Трьохмірна модель пристрою імпульсної струї

Перед соплом створена форкамера, яка служить для вирівнювання і заспокоєння потоку. Довжина форкамери 1,5...2 калібрів. На початку форкамери установлений хонейкомб, який служить для вирівнювання потоку, і решітки, які гасять пульсації потоку і вирівнюють швидкість по величині.

На рис. 5 зображені лінії току. З рисунку видно, що у камері заспокоєння за спрямовуючою конструкцією є два типи руху:

- струї, які сходяться і розганяються в напрямі до вихідного отвору;
- блукуючі струї, що виникають як вторинні вихори від руху першого типу струї.



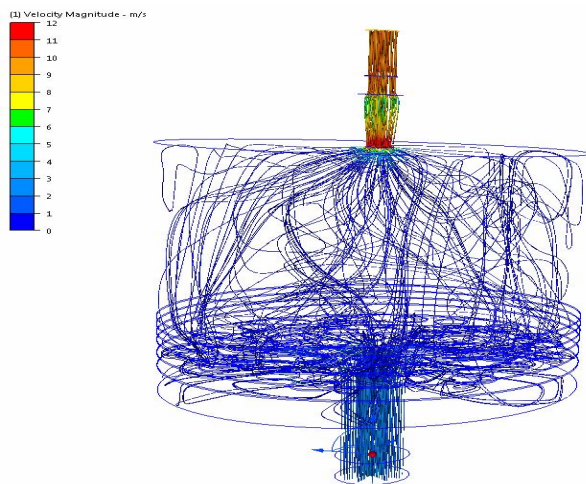


Рис. 5. Лінії току у пристрої

На рис. 6 показані струмки рідини, які на початку сопла прискорюються, а на кінці сопла стискаються, при цьому струмки отримують на вході з сопла від'ємні компоненти радіальної швидкості (за напрямом до центру струї).

Результати комп'ютерного моделювання показали (рис. 7), що при швидкості витікання з сопла 10 м/с інтенсивність турбулентності в перерізі поблизу решіток достатньо висока і місцями досягає 60%, а в перерізі середньої частини свобідного простору камери була на рівні 30% і практично рівномірною по всьому перерізу.

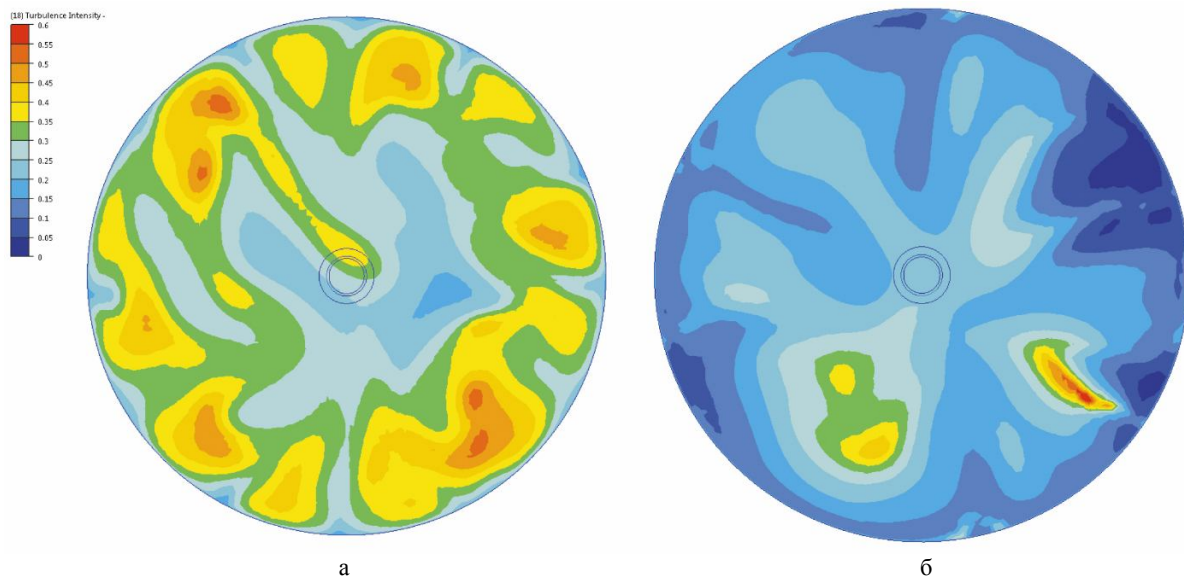


Рис. 7. Профілі розподілу інтенсивності турбулентності в перерізах камери форсунки: а – поблизу решіток, б – по середині вільного простору

Оцінимо потужність такого водомету для руйнування льоду. Міцність льоду, відповідно до [24] як результат ділення зусилля стиснення, при якому настало руйнування зразка льоду розміром  $70 \times 70 \times 70$  мм, на площу опорної поверхні зразка, при температурі  $0^\circ \text{C}$  становить  $16 \text{ кгс/см}^2$ , тобто  $160 \text{ Н/см}^2$ .

Визначимо яким повинні бути параметри одного імпульсного заряду водомету. Оберемо переріз

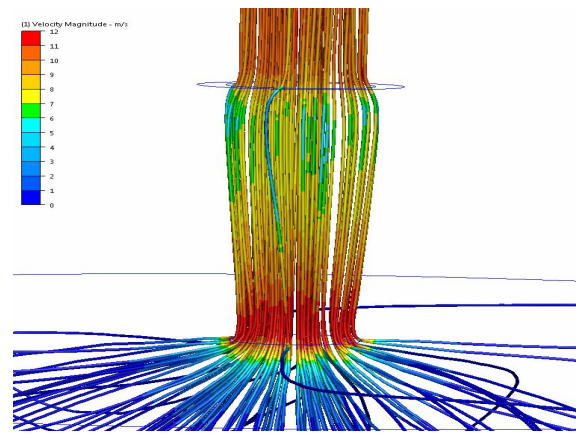


Рис. 6. Розгін «пучка» у соплі

Як можна припустити, саме наявність від'ємної радіальної компоненти перешкоджає її руйнуванню на початковому етапі її існування, так як відповідно до теорії в'язких потоків одна з властивостей в'язкого потоку є кут полурозкриття [23].

На виході з сопла інтенсивність турбулентності ще зменшується: по краях до 35% у центрі – до 5-10% (рис. 8).

Результати проведеного модулювання можна трактувати в якості доказів відсутності КМ турбулентної течії на виході з сопла струї і далі у самій струї. Це дає надію, створення на цьому принципі імпульсного водомету дозволить швидко руйнувати льодові затори на річках в період льодоходу.

струї  $S = 10 \text{ см}^2$ , що відповідає  $d = 3,56 \text{ см}$ . Для того щоб забезпечити руйнування льоду, струї такого діаметру повинні створювати зусилля  $F = 1600 \text{ Н}$  (що рівнозначно дії маси  $160 \text{ кг}$  на площу  $10 \text{ см}^2$ ).

Оцінимо необхідний імпульс струї  $p$  з виразу  $F = dp/dt$ , за умови рівномірної втрати імпульсу у момент удару по перешкоді –  $F = \Delta p/\Delta t$ .

Подальша оцінка потребує завдання реальних параметрів: довжини струї та її швидкості.

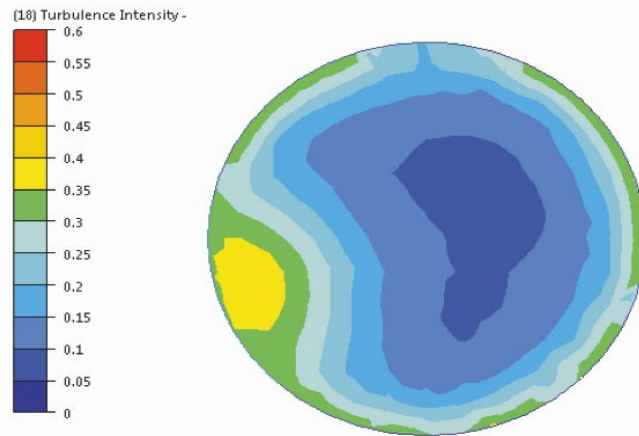


Рис. 8. Профілі розподілу інтенсивності турбулентності на виході з сопла

Оберемо довжину  $L = 2\text{ м}$ , це буде відповідати об'єму заряду  $V = L \cdot S = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^3$  або 2 літра.

Відповідно маса  $m = 2\text{ кг}$ , а імпульс  $p = mv$  при припущеній швидкості  $v = 100\text{ м/с}$  становить  $200\text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

Час зміння імпульсу  $\Delta p$ , в такому випадку його втрата, відповідає часу руйнування струї довжиною 2 м, яка рухається зі швидкістю 100 м/с, при зіткненні з перешкодою:

$$\Delta t = 2/100 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ с} = 20\text{ мс.}$$

Таким чином, при вибраних параметрах струї отримаємо руйнуючу дію  $F = \Delta p / \Delta t = 1 \cdot 10^4 \text{ Н}$ , тобто  $1000\text{ Н/см}^2$ , що в 6,25 разів більше, ніж міцність льоду.

### 3. Основи конструкції водомету

Проведений аналіз властивостей ДМ турбулентності комп'ютерне моделювання та оцінка параметрів імпульсного заряду водомету дозволяють запропонувати наступну принципову схему імпульсного водомету (рис. 9).

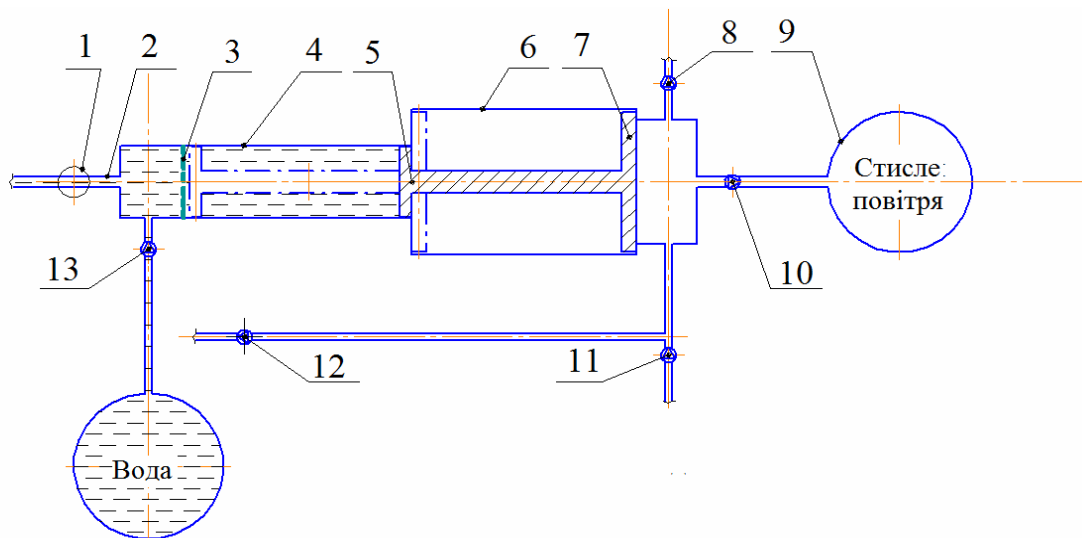


Рис. 9. Принципова схема імпульсного водомету:

- 1 – затвор сопла; 2 – сопло; 3 – решітки; 4 – ствол; 5 – поршень ствола;
- 6 – циліндр пневматики; 7 – поршень пневматики; 8 – клапан скиду тиску;
- 9 – ресивер; 10 – клапан ресивера; 11 – редуктор високого тиску;
- 12 – клапан пневматики затвора; 13 – клапан подачі води

До початкових параметрів конструкції відносяться тільки діаметр водяного заряду і швидкість вилиту струї. Тільки після відпрацювання цих параметрів в режим безперервної течії отримання ДМ турбулентності можна буде переходити до імпульсного режиму і підібрати оптимальну довжину струї.

Мінімальна довжина ствола повинна забезпечувати об'єм повної маси води в струї або бути кратною декільком порціям.

Викид води здійснюється пневматичним методом. Щоб уникнути високого тиску у повітряному

циліндрі водомету, тиск на воду створюється подвійним поршнем різного перерізу: одна його частина – 5 рухається в каналі ствола 4, інша – 7 рухається в циліндрі пневматики. Викид води відбувається при постійному тиску, що забезпечується за допомогою ресивера.

Особливо важливим елементом конструкції є затвор сопла. Він повинен бути швидкодіючим, менше ніж 20 мс і витримувати великий тиск. Пропонується виготовити його у вигляді затвора з пневматичним приводом.

## Висновок

Проведено теоретичне обґрунтування способу швидкого руйнування льодових заторів на річках в період льодоходу, зроблена оцінка оп-

тимальних параметрів струменю води за допомогою комп'ютерного моделювання, визначено основні параметри пристрою з кількісною оцінкою можливості руйнування пластів льоду різних габаритів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клименко В. Г. *Загальна гідрологія*: Навчальний посібник для студентів. Харків: вида-во ХНУ, 2008. 144 с.
2. На річках Полтавщини «розгулялись» льодоходи <https://poltava.depo.ua/ukr/poltava/na-richkah-poltavschini-rozglyalis-lodohodi-foto-video-20180406754> 988.
3. Защита опор от ледохода. <http://fccland.ru/ekspluatsiya-mostov/3646-zaschita-opor-ot-ledohoda.html>.
4. Наказ Державного агентства водних ресурсів України № 198 «Про пропуск льодоходу, повені та паводків у 2014 році» від 25 грудня 2013 р. [Електронний ресурс.] Режим доступу: <http://ovg.ck.ua/povin2014ovg.pdf>.
5. Закон України № 5403-VI р. із змінами «Про Кодекс цивільного захисту України» від 02 жовтня 2012 р. [Електронний ресурс.] Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17/page>.
6. Тавризов В.М. *Защита мостов и других объектов от ледохода*. Москва: Литература по строительству, 1971. 199 с.
7. Машевський В.Ф., Мясников Т.Ф. *Руководство по подрывным работам*. Москва: ВИ МО СССР, 1969. С. 349-373.
8. *Способ ликвидации ледяного затора*. [Електронний ресурс.] Режим доступу: [http://www.findpatent.ru/img\\_show/814/8142404.html](http://www.findpatent.ru/img_show/814/8142404.html).
9. В Казахстане взрыв льда на реке уничтожил окна в городских многоэтажках <https://tsn.ua/ru/svit/v-kazahstane-vzryv-lda-na-reke-unichtozhil-okna-v-gorodskih-mnogoetazhkah-1132323.html>.
10. Лаврентьев, М. А. *Вопросы теории и практики импульсных водяных струй*. М. А. Лаврентьев, Э. Г. Антонов, Б. В. Войцеховский. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1961. 347 с.
11. Атанов, Г. А. *Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород*, Киев: Выща школа, 1987. 152 с.
12. Толкачов А.М. Импульсное водометное орудие. *Збірник наукових праць АБВ МВСУ*. Харків: АБВ МВСУ, 2012. Вип. 2. С. 81-87.
13. Sidorenko I. Tolkachev A. Using small-scale turbulence for forming a solid fluid jet. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2018. Вип. 1(55). С. 185-188.
14. Ван-Дайк М. *Альбом течений жидкости и газа*. Москва: Мир, 1986. 184 с.
15. Monin A. S., Yaglom A. M. *Statistical Fluid Mechanics*, Volume II, Donver Ed., 2007. 871 p.
16. Hurst D. J, Vassilicos J. C. Scalings and decay of fractal-generated turbulence. *Phys. Fluids* Vol. 19, 2007, p. 035103-1-31.
17. Hof B., Westerweel J., Schneider T., Eckhard, B. Finite lifetime of turbulence in shear flows. *Nature*, 2006. Vol. 443 p. 59–62.
18. Hof B., de Lozar A., Kuik D.J., Westerweel J. Repeller or attractor? Selecting the dynamical model for the onset of turbulence in pipe flow. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 101(21), 214501.
19. Курбацкий А.Ф. *Лекции по турбулентности, часть 1*. Введение в турбулентность. Учебное пособие. Новосибирск, 2000. 118 с.
20. Cardwell N. D., Vlachos P. P., Thole K. A. Developing and fully developed turbulent flow in ribbed channels. *Exp Fluids*, 2011. Vol. 50, 1357–1371.
21. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва: Машиностроение, 1992. 672 с.
22. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. Москва: Из-во «Дрофа», 2003. 676 с.
23. Вулис Л.А., Кашакаров В.П. *Теория вязкой жидкости*. Москва: Наука. 1965. 431 с.
24. И. И. Батраков, Ю. А. Носков, В. Н. Харламов, В. А. Шкурин *Перевозка сменяющихся грузов*: Справочник; Под ред. Ю. А. Носкова. Москва; Транспорт, 1988. 208 с.

Received (Надійшла) 11.09.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.10.2020

**Theoretical justification of methods  
for rapid elimination of ice blocks on rivers**

A. Tolkachev, O. Tretyakov, S. Harbuz, O. Roianov

**Abstract. Topicality.** The article shows that it is the pulsed release of water can be considered when creating a water jet to destroy the ice with a long range. Tests of water emissions at high speeds, more than a few tens of meters per second, found that the emissions occur in the form of a dispersed jet, which is quickly sprayed. The main destabilizing factor of the jet, which triggers the external mechanisms of its destruction is turbulence. Combating turbulence by providing a smoother flow near the walls of the channel and nozzle shifts the beginning of the turbulence process, but does not eliminate it. Thus, traditional hydrodynamic approaches do not significantly affect turbulence. **The purpose of this work** is a theoretical substantiation of the method of rapid destruction of ice jams on rivers during the ice drift. To achieve this goal, the **following tasks** were solved: development of a theoretical justification for the destruction of ice using a discrete high-velocity jet; estimation of optimal jet parameters with the help of computer modeling; determination of the main parameters of the device with a quantitative assessment of the possibility of destruction of ice layers of different sizes. **Conclusion.** Theoretical substantiation of the method of rapid destruction of ice jams on rivers during the ice drift, the assessment of the optimal parameters of the water jet using computer simulation, the main parameters of the device with a quantitative assessment of the possibility of destruction of ice layers of different sizes.

**Keywords:** river, ice jams, ice destruction, high speed jet.