

**О. Л. ШУБЕНКО, В. Й. САФОНОВ, М. Ю. БАБАК, О. В. СЕНЕЦЬКИЙ, М. Л. ЄВИЧ,  
О. Ю. БОЯРШИНОВ**

### **ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ОСТАННЬОГО СТУПЕНЮ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ПРИ СУПЕРГІДРОФОБНОМУ ПОКРИТТІ ЇЇ СОПЛОВИХ АПАРАТІВ**

Проведено аналіз структури руху і утворення крупних крапель в міжлопатковому каналі парової турбіни. Отримано, що попадання крапель на поверхню лопаткового апарату призводить до виникнення плівки з наступним зривом потоку з вихідної кромки у вигляді крупних ерозійнонебезпечних крапель. Саме тому виникає задача оцінки можливості впровадження нанотехнологій на основі супергідрофобних покриттів для підвищення ефективності та надійності проточних частин парових турбін. Досліджувалась можливість використання супергідрофобних покриттів поверхонь напрямних апаратів вологопарових ступенів для підвищення якості проточної частини потужної парової турбіни. Проаналізовано сучасні підходи до нанесення супергідрофобних покриттів на металеві поверхні. Наведено загальну структуру ерозійно-стійкого покриття, що включає металеву матрицю, полімерний полісилоксановий наповнювач з активованих рівномірно розподілених по товщині гідрофобних частинок різної форми, в тому числі лускатих, і внутрішній ерозійно-стійкий шар. Розглянуто особливості фізичних процесів: змочуваності твердих поверхонь, течії вологої пари в турбіні, стан проблеми. Виконано оцінки з визначення впливу супергідрофобних покриттів, при нанесенні їх на сопловий апарат вологопарового ступеня, на втрати енергії та витрати пари у ступені турбіни. Уперше показано, що реалізація цієї пропозиції повинна привести до суттєвого зменшення розміру крапель вологи в проточній частині та, як наслідок, до збільшення ресурсу робочих лопаток і електричної генерації. Останнє відбувається за рахунок зменшення втрат енергії на тертя на соплових лопатках, при ударах крапель вологи та обтіканні робочих лопаток, а також падіння витрати пари при сепарації. Експертним оцінюванням параметрів, що визначають це зменшення втрат, прогнозовано обсяг додаткової генерації від впровадження супергідрофобних покриттів на соплах останнього ступеня турбіни К-325-23,5.

**Ключові слова:** парова турбіна, соплова лопатка, супергідрофобне покриття, втрати у вологопаровому ступені, ресурс робочої лопатки, електрогенерація.

**А. Л. ШУБЕНКО, В. И. САФОНОВ, Н. Ю. БАБАК, А. В. СЕНЕЦКИЙ, Н. Л. ЕВИЧ,  
А. Ю. БОЯРШИНОВ**

### **УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ СУПЕРГИДРОФОБНОМ ПОКРЫТИИ ЕЕ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ**

Проведен анализ структуры движения и образования крупных капель в межлопаточном канале паровой турбины. Получено, что попадание капель на поверхность лопаточного аппарата приводит к возникновению пленки с последующим срывом потока с выходной кромки в виде крупных эрозийноопасных капель. Именно поэтому возникает задача оценки возможности внедрения нанотехнологий на основе супергидрофобных покрытий для повышения эффективности и надежности проточных частей паровых турбин. Исследовалась возможность использования супергидрофобных покрытий поверхностей направляющих аппаратов влажнопаровых ступеней для повышения качества проточной части мощной паровой турбины. Проанализированы современные подходы к нанесению супергидрофобных покрытий на металлические поверхности. Представлена общая структура эрозийно-стойкого покрытия, которая включает металлическую матрицу, полимерный полисилоксановый наполнитель из активированных равномерно распределенных по толщине гидрофобных частиц различной формы, в том числе чешуйчатых, и внутренний эрозийно-устойчивый слой. Рассмотрены особенности физических процессов, связанных со смачиваемостью поверхности, течением влажного пара в турбине, состоянии проблемы. Выполнены оценки по определению влияния супергидрофобных покрытий, при нанесении их на сопловый аппарат влажнопаровой ступени, на потери энергии и расхода пара в ступени турбины. Впервые показано, что реализация этого предложения должна привести к существенному уменьшению размера капель влаги в проточной части и, как следствие, к увеличению ресурса рабочих лопаток и электрической генерации. Последнее происходит за счет уменьшения потерь энергии на трение на сопловых лопатках, при ударах капель влаги и обтекании рабочих лопаток, а также падения расхода пара на сепарацию. Экспертным оцениванием параметров, определяющих это уменьшение потерь, спрогнозирован объем дополнительной генерации от внедрения супергидрофобных покрытий на соплах последней ступени турбины К-325-23,5.

**Ключевые слова:** паровая турбина, сопловая лопатка, супергидрофобное покрытие, потери во влажнопаровой ступени, ресурс рабочей лопатки, электрогенерация.

**O. SHUBENKO, V. SAFONOV, M. BABAK, O. SENESTKYI, N. EVICH, A. BOYARSHINOV**

### **INCREASE IN THE RESOURCE AND ELECTRIC POWER OF THE LAST STAGE OF A STEAM TURBINE WITH A SUPERHYDROPHOBIC COATING OF ITS NOZZLES**

The analysis of the structure of motion and the formation of large drops in the interblade channel of a steam turbine is carried out. It was found that the hit of drops on the surface of the blade apparatus leads to the formation of a film with the subsequent stalling of the flow from the trailing edge in the form of large erosion-hazardous drops. That is why the problem of assessing the possibility of introducing nanotechnologies based on superhydrophobic coatings to increase the efficiency and reliability of the flow paths of steam turbines is arisen. The possibility of using superhydrophobic coatings of the surfaces of the guide vanes of wet steam stages to improve the quality of the flow path of a powerful steam turbine was investigated. Modern approaches to the application of superhydrophobic coatings on metal surfaces are analyzed. The general structure of an erosion-resistant coating is presented, which includes a metal matrix, a polymeric polysiloxane filler of activated hydrophobic particles of various shapes, evenly distributed over the thickness, including flaky ones, and an internal erosion-resistant layer. The features of physical processes associated with surface wettability and wet steam flow in a turbine, and the state of the problem are considered. Estimates were made to determine the effect of superhydrophobic coatings, when applied to the nozzle apparatus of a wet-steam stage, on energy losses and steam consumption in the degree of the turbine. It is shown for the first time that the implementation of this proposal should lead to: a significant reduction in the size of moisture droplets in the flow path and, as a consequence, an increase in the resource of the rotor blades and electrical generation. The latter occurs due to a decrease in energy losses: for friction on the nozzle blades, with impacts of moisture drops and flow around the rotor blades, as well as a drop in steam consumption for internal separation. An expert assessment of the parameters determining this reduction in losses predicted the volume of additional

© О. Л. Шубенко, В. Й. Сафонов, М. Ю. Бабак, О. В. Сенецький, М. Л. Євич, О. Ю. Бояршинов, 2020

generation from the introduction of superhydrophobic coatings on the nozzles of the last stage of the K-325-23,5 turbine.

**Keywords:** steam turbine, nozzle blade, superhydrophobic coating, losses in a wet steam stage, resource of a rotor blade, electric power generation.

**Вступ.** Розвиток нанотехнологій та прагнення вдосконалити ефективність проточних частин парових турбін призвели в останні 10–15 років до інтересу з підвищення надійності вологопарових ступенів (ВПС) шляхом застосування супергідрофобних покриттів (SH – у англійських джерелах) їх соплових лопаток (СЛ). Слід відзначити, що ці заходи виконуються у додаток до традиційних методів забезпечення ресурсу робочих лопаток (РЛ) [1, 2].

**Мета дослідження** оцінити сучасний стан проблеми використання SH покриттів СЛ ВПС парових турбін для підвищення ефективності їх проточних частин та висвітлити ряд важливих питань, що пов'язані з перспективами її розв'язання.

**Механізм дії SH покриття напрямної лопатки на течію пари у ВПС.** При течії вологої пари в проточній частині турбіни (див. рис. 1) на поверхні без покриття утворюється плівка води товщиною до 10–12 мкм, що потім зривається з вихідної кромки у вигляді крупних ерозійнонебезпечних крапель діаметром 80–120 мкм, які далі бомбардують вхідну кромку РЛ [1].

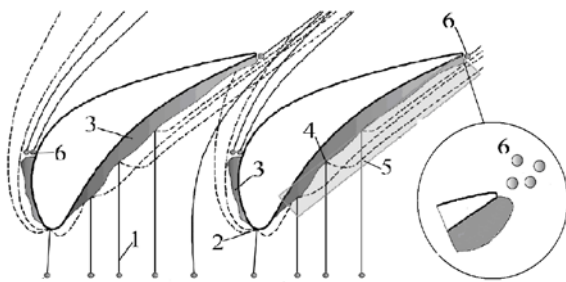


Рис. 1. Структура руху і утворення крупних крапель в міжлопатковому каналі парової турбіни [3]:

- 1 – первинні краплі; 2 – «фонтан» з вторинних крапель, що утворилися на вхідній кромці; 3 – водяна плівка;
- 4 – взаємодія крапель з плівкою і змоченою поверхнею;
- 5 – «паро-крапельний шар» з вторинних крапель; 6 – зрив водяної плівки з поверхні лопатки у вигляді крупних крапель

При SH властивості покриття поверхня СЛ ВПС не змочується (плівка води не виникає), в проточній частині турбіни тече потік із невеликих ерозійнонебезпечних крапель діаметром до 20 мкм, що дає змогу підвищити ресурс РЛ.

Цей ефект підтверджено результатами досліджень обтікання вологим потоком на тихохідному повітряному стенді решітки нерухомих лопаток з різним покриттям щодо змочуваності з фіксацією розміру крапель води на виході [4]. При SH зернистому покритті лопаток утворювалися краплі води розміром у 5–7 разів меншим ніж при стандартній поверхні без покриття. Причому краплі з меншим еквівалентним діаметром утворювалися частіше при зростанні числа Маха [4].

Позитивний вплив зменшення діаметру крапель в проточній частині ВПС на прогнозний час експлуатації турбіни підтверджують результати

дослідження [5] (рис. 2), де видно, що при швидкості  $C_{\text{крап}} = 650$  м/с, яка характерна для РЛ останніх ступенів турбін, та діаметрі крапель 20 мкм  $\tau_i \approx 16000$  год (крива 3), а при діаметрі крапель 80 мкм (крива 2)  $\tau_i \approx 1160$  год, тобто прогнозний час експлуатації турбіни у ~ 14 разів менше.

Керуючись цими даними, припустимо, що SH покриття СЛ ВПС може суттєво збільшити ресурс РЛ, питання тільки в витривалості самого покриття.

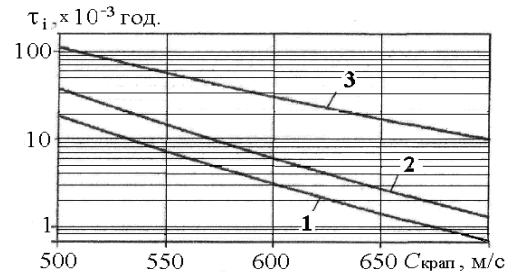


Рис. 2. Прогнозний час експлуатації турбіни  $\tau_i$  з РЛ останнього ступеня довжиною 1220 мм в залежності від швидкості зіткнення крапель води зі вхідною кромкою

$C_{\text{крап}}$  при різних діаметрах крапель [5]:  
1 – 120 мкм; 2 – 80 мкм; 3 – 20 мкм

**Стан проблеми застосування SH покриттів для СЛ ВПС турбінних ступенів.** У відкритому доступі є інформація про дослідження можливостей застосування SH покриттів для СЛ турбінних ступенів [6–8], про відповідні патенти, наприклад, [9, 10].

Так китайські фахівці повідомляють: що експерименти з використанням модельної СЛ із SH покриттям підтвердили зменшення крапель після турбінного ступеня [6], що SH обробка нерухомих лопаток турбіни допомагає зменшити пошкодження РЛ від крапель води [7].

В «МЕІ», Росія, досліджують можливості використання протиерозійних покриттів для турбінних лопаток в тому числі з SH властивостями [8].

Патенти же свідчать про пріоритет або в ідейних рішеннях [9], або дають інформацію про склад та структурні характеристики SH покриттів [10].

Значущих же даних про використання SH покриттів у реальних парових турбінах нами не знайдено. Тобто на даний час практично відсутня відкрита інформація з таких питань:

- в якій мірі SH властивості покриттів СЛ впливають на характеристики ВПС;

- яка вартість і витривалість з урахуванням темпу деградації SH покриттів СЛ турбінного ступеня циліндру низького тиску (ЦНТ) може бути забезпечена.

Останні роки дослідження по темі створення SH покриттів направлені на підвищення їх витривалості та технологічності (зменшення вартості) [11]. Для вирішення цих питань слід приймати до уваги особливості процесів, що мають місце при взаємодії твердої поверхні (лопатки) з рідиною.

**Фізичні моделі взаємодії твердої поверхні з рідиною.** В результаті з'ясування структури поверхні на мікро- та нанометричному рівні [11], виявлено ряд моделей взаємодії твердої поверхні з рідиною, основні з них: Юнга, Венцеля, Кассі-Бакстера (надалі Кассі), див. рис. 3.

Рівновагу між силами, що діють на краплю на твердій гладкій підкладці (див. рис. 3, а), описує рівняння Юнга [11], яке застосовується лише до гладких, однорідних поверхонь інертних до рідини (в природі не зустрічаються):

$$\cos\theta = (\sigma_{SV} - \sigma_{SI})/\sigma_{1V}, \quad (1)$$

де  $\theta$  – статичний контактний кут, поверхневі енергії переходу:  $\sigma_{SV}$  – тверда фаза – пара,  $\sigma_{SI}$  – тверда фаза – рідка, а  $\sigma_{1V}$  – рідка фаза – пара (поверхневий натяг рідини).

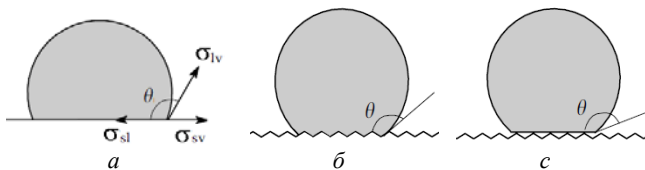


Рис. 3. Крапля на підкладці. Режими змочування поверхні [11]: а – Юнга; б – гомогенний Венцеля; с – гетерогенний Кассі

В залежності від величини кута взаємодії краплі з ідеальною твердою поверхнею визначають такі типи покриттів: супергідрофільне ( $\theta \leq 10^\circ$ ), гідрофільне ( $10^\circ < \theta < 30^\circ$ ), гідрофобне ( $\theta > 90^\circ$ ) та SH ( $\theta \geq 150^\circ$ ).

Венцелем [11] запропоновано модель режиму змочування (рис. 3, б), що враховує коефіцієнт шорсткості  $r$  ( $r > 1$ ), який визначається як відношення фактичної площі поверхні до геометричної (на гладкій поверхні). При цьому видимий контактний кут  $\theta_B$ , що посилений шорсткістю, задається рівнянням  $\cos\theta_B = r \cdot \cos\theta$ .

Іншою моделлю, що описує поведінку краплі рідини при контакті з твердою поверхнею, є модель Кассі [11]. Це випадок, коли краплина рідини не може проникнути (див. рис. 3, с) у газові (парові) «кишені» між пагорбами, що характеризують шорсткість поверхні. У цій моделі кут  $\theta_B$  враховує поверхню, що знаходиться в безпосередньому контакті з рідиною, і розраховується таким чином:

$$\cos\theta_B = f_\phi (\cos\theta + 1) - 1, \quad (2)$$

де  $f_\phi$  – доля проекції площі, що змочується, від поверхні підкладки.

У стані Кассі контакт краплі з газом зменшує тертя по поверхні лопатки, що важливо при течії пари в умовах проточної частини турбіни.

Які стани щодо змочуваності (Венцеля чи Кассі) мають місце на реальній поверхні при зміні  $\cos\theta$ , ілюструє рис. 4, де видно, що є критичний контактний кут  $\theta_K$ , який визначає перехід від стану Венцеля до Кассі.

Модель Венцеля термодинамічно більш стабільна і є станом рівноваги моделі Кассі.

Зауважимо, що співвідношення (1) і (2) можна

застосовувати для аналізу крайових кутів, тільки якщо характерні розміри шорсткості багато менші діаметру контакту краплі з підкладкою [11].

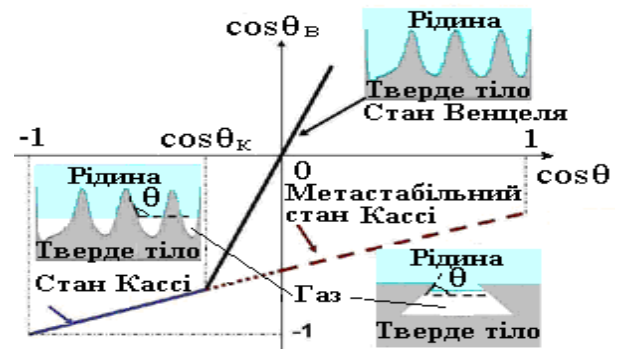


Рис. 4. Зв'язок  $\cos\theta_B$  видимого кута з  $\cos\theta$  плоского

Оскільки розмір крапель вологи залежить від SH властивості важливим є наступне.

Для того, щоб поверхня вважалася SH [11], слід виконати такі умови: високий видимий контактний кут ( $\theta_B > 150^\circ$ ), кут скошування  $\alpha < 10^\circ$  (кут нахилу поверхні, при якому крапля починає скошуватися), низький гістерезис  $\Delta\theta$  (кілька градусів), висока стабільність стану змочування Кассі. При цьому SH поверхня, як правило, має шорсткість 4–6 мкм, її поверхнева енергія дуже низька (знижена шляхом осаження сполук з низькою енергією, таких, наприклад, як полідиметилсилоксан (ПДМС)).

Гістерезис кута контакту  $\Delta\theta$  є різниця між кутами наступу (advance)  $\theta_{adv}$  та відступу (receding)  $\theta_{rec}$ , тобто  $\Delta\theta = \theta_{adv} - \theta_{rec}$ , і є загальним для неоднорідних та шорстких поверхонь (залежить від швидкості руху та об'єму рідини, що використовується для вимірювань, а також від того, проводяться останні в статичних або динамічних умовах) [11].

Малий кут скошування  $\alpha$  однозначно вказує на переважання гетерогенного режиму змочування (площа контакту підкладки з водою є мінімальна).

Стійкий гетерогенний режим змочування (Кассі) забезпечується при рельєфі упадин, що розширюються у сторону дна (див. рис. 4, нижнє зображення справа). Він може реалізуватися тільки у системах, в яких площа поверхні упадини, що не змочується, перевищує подвоєну площу поверхні рідина/газ [11].

Стан Кассі, відповідає краплям, які нанесені на гідрофобну підкладку, тоді як стан Венцеля відноситься до крапель після удару по поверхні («нанизаних»). За переходи між цими станами відповідальні зовнішні подразники (наприклад, тиск, вібрація), які спричиняють зміни контактного кута падіння. Цей факт (важливий при застосуванні SH покриттів у проточній частині турбіни) є результатом посилення взаємодії рідина-газ (рідина проникає у опору). Саме механізми переходу змочування від однієї моделі до іншої досліджують при розробці стабільних SH матеріалів. Для отримання матеріалів з великими кутами  $\theta$  необхідно використовувати сумісний вплив шорсткості поверхні і хімічної структури [11].

**Приклади сучасних SH покриттів для металевих поверхонь.** Властивості SH покриттів визначаються не стільки характеристиками матеріалу, скільки властивостями та структурою поверхневого шару товщиною в кілька нанометрів [11]. Існує два принципових типа SH покриттів: впорядковані і невпорядковані. Більше уваги приділяється дослідженню останніх, оскільки це менш витратний шлях.

Дослідимо досягнення у створенні витривалих SH покриттів.

На рис. 5 наведено загальну структуру SH ерозійно-стійкого покриття [10], що включає металеву матрицю 1 (служить для зв'язування частинок з підкладкою), полімерний полісилоксановий наповнювач (до 50 об'ємних %) з активованих рівномірно розподілених по товщині гідрофобних частинок 2 різної форми, в тому числі лускатих – 3, і внутрішній ерозійно-стійкий шар. Металева матриця покриття [10] містить нікель або його сплави.

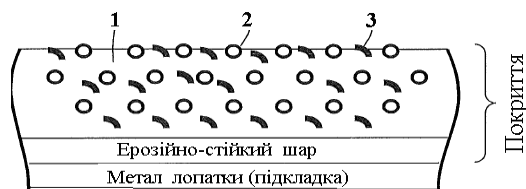


Рис. 5. Структура SH покриття [10]

Гідрофобне ерозійно-стійке покриття на турбінні та компресорні лопатки пропонується наносити електролітичним плакуванням нікелем або хімічним відновленням з подальшим відпалом наповнювача [10]. Воно допускає локальне відновлення після ерозійних ушкоджень як без зняття лопаток, так і після демонтажу, є простим і ефективним рішенням.

Досить витривале SH покриття, яке складається з полішарів композитних наночастинок зі структурою «полістирольне (ПС) ядро/SiO<sub>2</sub>», що зшита ПДМС, представлено у [12]. Товщина SiO<sub>2</sub> оболонки ~ 15 нм,  $\theta_B \approx 167^\circ$ . За рахунок визволення з композиту частинок з ПС (їх діаметр ~ 150 нм) на поверхню при пошкодженні покриття його SH властивості відновлюються.

В [13] запропоновано гібридні еластомерні/металооксидні наноструктурні матеріали для міцних і тих, що можуть самовідновлюватися, SH поверхонь на основі ПДМС/діоксид титану (TiO<sub>2</sub>). Для зовнішнього каркасу покриття застосовується тонка плівка TiO<sub>2</sub>. Товщина шару металевої матриці на підкладці ~ 10–300 нм. Таке покриття діє як жорсткий захисний шар від механічного, термічного, хімічного впливу [14].

У США розроблено витривале SH покриття [14] що самовідновлюється. Воно складається з суміші матеріалу, що зветься «фторований поліуретановий еластомер», і спеціалізованої SH молекули, яка відома як «F-POSS». Воно легко наноситься шляхом напилення, має злегка гумову еластичну текстуру, витримує 5000 циклів стирання за Табером [15]. Властивість покриття самовідновлюватися обмежена

тільки його товщиною.

Для визначення стираності покриттів за Табером використовується абразиметр [15]. Для іспитів зразок (пластинка діаметром 100–120 мм, товщиною до 2 мм) закріплюється на диску приладу, який обертається з частотою 60 об/хв. Абразивні диски притискаються до зразка за допомогою вантажів (250 г, 500 г, 1000 г), що входять у комплектацію. Зразок зважується до і після випробувань (закінчуються при втраті SH властивостей). Результат випробувань виражається як маса втрат (різниця при зважуваннях в мг).

Методом електроосадження розроблено надійні SH нікелеві мікро/наноструктури з антикорозійними і трибологічними властивостями [16]. При нанесенні нікелевого SH покриття (товщина ~ 7 нм, кути: контакту  $165 \pm 3^\circ$ , ковзання  $3 \pm 1^\circ$ ) поверхня сталі вкривається структурою у вигляді листа лотоса з мікромасштабними сосочками і нанорозмірними стовпчастими острівцями (див. на рис. 6 зображення, що отримане за допомогою електронного мікроскопу). Поверхня зразка зберігала SH властивості після випробування на абразивне стирання по наждачному папері при довжині переміщення у 160 см.

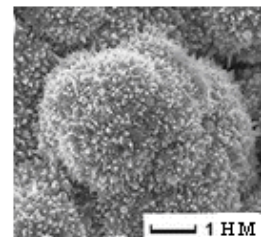


Рис. 6. Морфологія поверхні зразка нікелевого покриття [17]

Останнім часом досить широко застосовуються і керамічні покриття на основі оксидів лантанодів [17, 18]. Вони мають гідрофобні і SH властивості, набагато міцніші ніж полімерні покриття.

Іншим перспективним напрямком є нанесення карбідо-хромових покриттів (мають високу ерозійну стійкість та гідрофобність) з використанням технологій атомно-іонного розпилення матеріалів у вакуумі (AIP) і піролітичного осадження [19].

Основою технології AIP є метод електронно-променевого випаровування матеріалу покриття виробу у вакуумі з наступною іонізацією парової фази і осадженням її на поверхню підкладки, який в даний час широко використовується для нанесення захисних покриттів різного типу [8, 20, 21].

Піролітичне покриття з карбіду хрому отримують з хромоорганічної рідини «Бархос» [19]. Ця унікальна і перспективна технологія вакуумного нанесення покриття, що розробляється в ННЦ ХФТІ, має таку перевагу, як можливість нанесення покриттів на внутрішні і зовнішні поверхні деталей складної геометрії (з глухими отворами, канавками) при забезпеченні однорідної товщини і складу. Процес нанесення покриття проходить у вакуумі при 450–500 °С на спеціальному виробничому обладнанні. Покриття, одержувані при піролізі, відрізняються



підвищеною корозійною зносостійкістю і гідрофобністю, мають гарну адгезію до вуглецевих і неіржавіючих сталей [19].

Як видно з наведених прикладів, для реалізації витривалих SH покриттів використовується цілий ряд достатньо складних технологій. Останнє призводить до зростання ціни на покриття і піднімає питання про їх ефективність. Отримаємо попередню відповідь на нього.

**Вплив SH покриття соплового апарату на втрати енергії та витрати пари у ступені турбіни.** Визначимо за рахунок впливу на які фізичні процеси у турбіні буде забезпечуватися ефект, що очікується від впровадження SH покриттів. Інформацію про відповідну силу впливу у відкритих джерелах нами не знайдено. Але щоб мати попередню уяву про це, достатньо оцінити вплив SH покриттів СЛ ВПС на показники експертним шляхом. Тобто оцінити можливі граничні зміни (оптимістичну і песимістичну) ряду відповідних параметрів ВПС, на які впливає SH покриття, а потім по цих параметрах розрахувати можливі зміни показника турбіни, наприклад її електричної потужності.

При SH покритті СЛ ступеня можливий ряд технічних рішень (ТР), як з точки зору вибору площі поверхні, що вкривається, так і стану характеристик покриття (змінні вони чи ні). Вплив на параметри стану ступеня слід оцінювати для кожного з ТР.

При оцінках показників турбоустановки після впровадження SH покриття вважаємо його нанесенням тільки на СЛ останнього ступеня, при цьому штатні системи внутрішньої сепарації вологи в проточній частині функціонують, остання РЛ є нова або її поверхня відновлена.

Розглянемо три ТР, що пов'язані з вибором площі поверхні СЛ для нанесення SH покриття: вкрита вся бокова поверхня (1 ТР), тільки увігнута сторона (2 ТР), тільки верхня половина увігнутої сторони (3 ТР). Причому покриття має незмінні властивості по всій поверхні СЛ, де застосовується.

Наші дослідження і аналіз інформаційних джерел свідчать, що ефект, очікуваний від впровадження SH покриттів СЛ і направлений на зменшення ерозії РЛ, буде забезпечуватися за рахунок зменшення [22]:

- втрат енергії на тертя  $\Delta \zeta_{тс}$  при обтіканні СЛ;
- витрати вологи при сепарації  $\Delta G_{сеп}$ ;
- механічних втрат  $\Delta \zeta_{мв}$  від удару крупних крапель по вхідній кромці РЛ;
- втрат енергії  $\Delta \zeta_{дл}$  при обтіканні РЛ (за рахунок подовження інкубаційного періоду ерозії).

При оцінюванні впливу зміни вказаних параметрів після SH покриття СЛ далі більш зручно оперувати їх відносними величинами, тобто  $\Delta \bar{\zeta}_{тс}$ ,  $\Delta \bar{G}_{сеп}$ ,  $\Delta \bar{\zeta}_{мв}$  та  $\Delta \bar{\zeta}_{дл}$ . Оскільки досить тривалий час після нанесення SH покриття ерозійний знос РЛ відсутній (триває інкубаційний період ерозії)  $\Delta \bar{\zeta}_{дл} = 0$ .

Розглянемо вказані ефекти від впровадження SH покриттів 1 ТР і оцінимо експертним шляхом параметри, що визначають втрати при початковому

використанні SH покриттів СЛ останнього ступеня турбіни К-325-23,5, для 2 ТР та 3 ТР. Відповідні результати, що отримані шляхом експертного оцінювання зведено у табл. 1.

*Зменшення втрат енергії на тертя при обтіканні напрямного апарату.* SH поверхні мають досить складний рельєф, і можуть стабілізувати бульбашки парової фази в середині порожнин рельєфу (див. рис. 7) [23]. При цьому рідина частково тече по твердій поверхні, а по паровій фазі.

Для поверхні, що заповнена рідиною (рис. 7, а), площина прилипання буде розташована між верхньою і нижньою поверхнями текстури (на неї екстраполюється нульове значення швидкості  $c$ ). Для стану зі стабільною паровою подушкою в порожнинах рельєфу (стан Кассі), ця площина буде лежати на дні текстури (див. рис. 7, б). Пунктирна лінія (рис. 7, а), показує, де знаходиться гладка неслизька стінка, що дає еквівалентний потік [23].

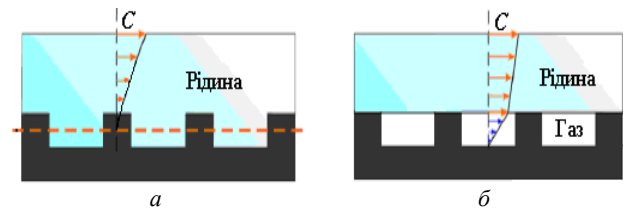


Рис. 7. Потік уздовж текстурованої SH поверхні в термінах ковзання для станів [23] з порожнинами, що заповнені: а – рідиною – стан Венцеля; б – паром – стан Кассі

Ковзання рідини полягає в тому, що в силу поверхневих властивостей (гідрофобність, наявність газу в порожнинах SH текстур поверхні та ін.) швидкість рідини на профілі СЛ стає відмінною від нуля, що і призводить до різкого збільшення довжини ковзання у таких поверхнях.

Для визначення величини втрати енергії на тертя  $\zeta_{тс}$  скористаємося відомою полуемпіричною методикою ВТІ [24]. Втрати  $\zeta_{тс}$  є тільки часткою втрат енергії в СЛ. Для соплових решіток з дозвуковою течією зі звукувальним каналом мінімальне значення втрат на тертя лежить у діапазоні 0,01–0,015 [22], (розрахункові втрати для останнього ступеня менші і склали для середнього перерізу  $\sim 0,44$  % [23]).

Вплив шорсткості поверхні на зниження опору чотирьох масштабованих SH текстур при обтіканні турбулентним водяним потоком дослідили фахівці Мічиганського університету [25]. Опір тертю вимірювався при повному зануренні в турбулентний потік з числами Рейнольдса в діапазоні  $10^4 \leq Re \leq 10^5$ . Зниження опору тертя у каналі, що сформований двома SH поверхнями, досягало 50 %. Попередні данні і це значення й використані для визначення діапазону зміни  $\Delta \bar{\zeta}_{тс}$ , див. табл. 1.

*Зменшення витрати вологи при сепарації.* Найчастіше у ПЧ ЦНТ потужних парових турбін застосовуються сепараційні щілини та отвори [21, 22, 26]: на поверхні СЛ (у тому числі на вхідних і вихідних кромках), на периферії за соплом в осьовому зазорі, на периферії РЛ.

Таблиця 1 – Запропоновані діапазони зміни параметрів, що визначають витрати енергії при використанні SH покриттів сопла для досліджуваних технічних рішень в початковий період

Діапазони зміни:	1 технічне рішення				2 технічне рішення				3 технічне рішення			
	$\Delta \bar{\xi}_{ггс}$	$\Psi_{сеп}$	$\Delta \bar{\xi}_{мв}$	$\Delta \bar{\xi}_{сл}$	$\Delta \bar{\xi}_{ггс}$	$\Psi_{сеп}$	$\Delta \bar{\xi}_{мв}$	$\Delta \bar{\xi}_{сл}$	$\Delta \bar{\xi}_{ггс}$	$\Psi_{сеп}$	$\Delta \bar{\xi}_{мв}$	$\Delta \bar{\xi}_{сл}$
Верхній	0,5	0,05	0,019	0	0,3	0,04	0,016	0	0,2	0,03	0,013	0
Нижній	0,1	0,02	0,015	0	0,1	0,02	0,013	0	0,1	0,01	0,011	0

Ступінь сепарації прийнято оцінювати коефіцієнтом сепарації  $\Psi_{сеп}$ , який визначається [22]

$$\Psi_{сеп} = \frac{\Delta G_B}{y \cdot G_B} = 0,06 - 0,1;$$

де  $\Delta G_B$  – кількість відведеної вологи,  $y$  – ступінь вологості потоку пари до вологовилучення,  $G_B$  – витрата вологої пари. Звідки маємо:  $\Delta G_B = \Psi_{сеп} \cdot y \cdot G_B$ .

Зрозуміло, що при використанні SH покриттів на СЛ останнього ступеня, змінитися може тільки  $\Psi_{сеп}$ .

Питання, що пов'язані з дослідженням систем видалення та подрібнення вологи в проточній частині турбіни, досить детально висвітлені у [26], де вказується, що через щілини на поверхні СЛ може бути відведено до 20 % вологи, у отвори на периферії за цією лопаткою до 30 % (дані отримані на дослідницьких стендах). В умовах реальної проточної частини  $\Delta G_B$  менші.

На поверхні СЛ після нанесення SH покриття (1 TP) плівки вологи, вірогідно, практично не буде, як і вологовилучення (вилучення пари відбудеться у той же кількості). Оскільки краплі малого розміру слідує за потоком, мало порівняно з великими краплями відклоняючись до периферії у бік отворів для сепарації, буде мати місце зменшення сепарації вологи у ці отвори (вважасмо на 40–50 %). Ефективність останнього процесу істотно залежить від осрової відстані між решітками, від кількості вологи на периферії проточної частини (рис. 8).

Важливим фактором, що впливає на експертні рішення з вологовилучення (2 TP та 3 TP), є зміна концентрації вологи по висоті СЛ (див.рис. 8) та данні про якості плівки вологи по сторонах СЛ. Що до відсутності SH покриття на опуклій стороні СЛ (2 TP), то товщина плівки вологи на ній значно менша ніж на увігнутій [26], що відповідно і відзначилося на зміні  $\Delta \Psi_{сеп}$ , див табл. 1.

Перед останньою РЛ турбіни К-300-240 середня вологість пари складає  $y_{1 сеп} = 0,064$  [27].

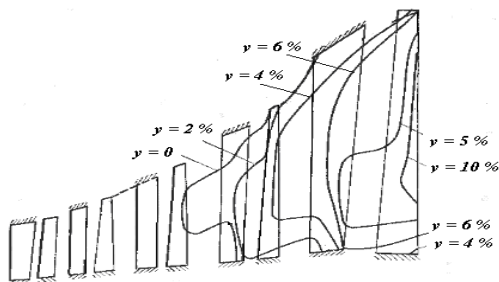


Рис. 8. Лінії рівної вологості в проточній частині ЦНТ потужної турбіни на номінальному режимі [22]

Як видно з рис. 8, найбільша ступінь вологості за останнім ступенем ЦНТ лежить у зоні 0,4–1,0 висоти РЛ. Тобто  $\Delta \Psi_{сеп}$  суттєво не зміниться (0,05–0,01, див. табл. 1).

*Зменшення механічних втрат енергії від удару крупних крапель.* Для оцінювання  $\Delta \bar{\xi}_{мв}$  використаємо результати досліджень з визначення потужності механічних втрат  $N_{мв}$  від вологості в останніх ступенях ЦНТ парових турбін [27]. На рис. 9 наведено залежність  $N_{мв}(y_{ср})$ , що побудована на основі вихідних даних останнього ступеня турбіни типу К-300-240 (ККД ступеня 0,8; міжвінцевий зазор 70 мм).

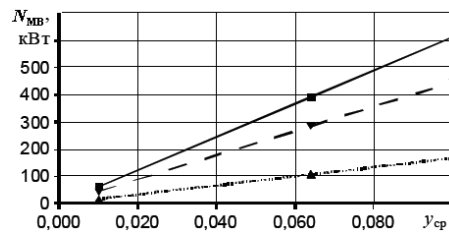


Рис. 9. Зміна потужності механічних втрат і її складових: —■— загальних механічних втрат; ---▼--- гальмування; ...▲... на розгін крапель від діаграмої вологості на середньому діаметрі ступеня  $y_{1 сеп}$  [27]

На номінальному режимі турбіни втрати на розгін крупних крапель склали ~106 кВт, на гальмування ~283 кВт, загальні механічні  $N_{мв} = 389$  кВт [27]), тобто  $\approx 4,9$  % потужності. При SH покритті СЛ останнього ступеня при зменшенні кількості крупних крапель та загальному підвищенні кількості вологи (зменшилася сепарація) втрати на розгін зміняться несуттєво (малих крапель більше і вони досягають більшої швидкості ніж великі); втрати же гальмування відчутно зменшаться, будемо вважати на ~50 %.

Таким чином механічні втрати від крупнодисперсної вологи (на розгін і гальмування) при SH покритті СЛ останнього ступеня К-300-240 досягнуть ~250 кВт, а зміна відносних механічних втрат  $\Delta \bar{\xi}_{мв}$  складе ~1,9 %, що з урахуванням експертних оцінок і відображено у табл. 1.

**Додаткова генерація електричної потужності після впровадження SH покриття.** Зрозуміло, що при SH покритті сопла останнього ступеня, потужність усіх ступенів турбіни за винятком останнього не зміниться. Можливу додаткову генерацію  $\Delta N_{Еост}^0$ , від впровадження SH покриття СЛ останнього ступеня визначимо для турбіни К-325-23,5 ПАТ «Турбоатом» (має 3 вихлопи, у ЦНТ дві ВПС [22]):

$$\Delta N_{E_{ост}} = N_{E_{ост}}(1 - \rho_{сер}) \Delta \bar{\xi}_{тс} \cdot \zeta_{тс} + N_{E_{ост}} \cdot \Delta \bar{\xi}_{мв} + N_{E_{ост}} \cdot \rho_{сер} [(1 + \psi_{сер} \cdot y^0)(1 + \Delta \bar{\xi}_{дл} \cdot \zeta_{дл}) - 1], \quad (3)$$

де  $\rho_{сер}$  – ступінь реактивності останнього ступеня на середньому радіусі;  $y^0$  – ступінь вологості до нанесення покриття.

Перший доданок у (3) є додаткова електрична потужність від зменшення тертя потоку у СЛ, другий – від зменшення механічних втрат від крупнодисперсної вологи, а третій – разом від зменшення сепарації пари та втрат від ушкодження РЛ крапельною ерозією.

Розрахуємо, використав дані з табл. 1, оптимістичне та песимістичне значення  $\Delta N_{E_{ост}}$ , що припустимо буде генеруватися після ШН покриття СЛ до зміни характеристик покриття або початку ерозії.

Вихідні дані для розрахунку  $\Delta N_{E_{ост}}^0$  останнього ступеня турбіни К-325-23,5 при номінальному навантаженні з використанням (3) такі: внутрішня потужність ступеня без ШН покриття СЛ складає  $N_{ост} = 7,93$  МВт, реактивність на середньому радіусі  $\rho_{сер} \approx 55,9\%$ ,  $\zeta_{тс} = 0,005$ ,  $\zeta_{дл} = 0,076$ .

Результати розрахунку зміни електричної потужності останнього ступеня турбіни К-325-23,5 при впровадженні запропонованих ТР стосовно ШН покриття його СЛ наведені у табл. 2, де  $\Delta N_{E_{ост}}^0 = \Delta N_{E_{ост}}^0 / N_{E_{ост}}^0$ .

Таблиця 2 – Залежність відносної та абсолютної зміни електричної потужності останнього ступеня турбіни К-300-240 при ШН покритті поверхні сопла для різних варіантів впровадження

Найменування величини	1 технічне рішення:		2 технічне рішення:		3 технічне рішення:	
	оптимістичне	песимістичне	оптимістичне	песимістичне	оптимістичне	песимістичне
$(1 - \rho_{сер}) \cdot \Delta \bar{\xi}_{тс} \cdot \zeta_{тс}, -$	0,001103	0,000441	0,000662	0,000221	0,000441	0,000221
$\rho_{сер} (\psi_{сер} y^0), -$	0,001957	0,000783	0,001565	0,000783	0,001174	0,000783
$\frac{\Delta N_{E_{ост}}^0}{N_{E_{ост}}^0}, \%$	2,21	1,32	1,82	1,10	1,56	1,00
$\Delta N_{E_{ост}}^0, \text{кВт}$	175	105	145	87	124	79

З аналізу результатів розрахунку видно (див. табл. 1 та 2), що при ШН покритті СЛ останнього ступеня турбіни найменший вклад у  $\Delta N_{E_{ост}}$  дає зменшення  $\Delta \bar{\xi}_{тс}$ , найбільший – зменшення  $\Delta \bar{\xi}_{мв}$ .

Значення  $\Delta N_{E_{ост}}$  для 2 ТР і 3 ТР реалізації ШН покриття СЛ не дуже відрізняються, оскільки більшість крапель значного розміру знаходиться у верхній зоні проточної частини, і вплив ШН покриття нижньої частини увігнутої сторони СЛ на зміну потужності ступеня порівняно незначний.

Таким чином, ШН покриття СЛ останнього ступеня усіх 3-х потоків по нашим оцінкам може дати підвищення електричної потужності турбіни К-325-23,5 на ~238–525 кВт. Найбільш вірогідне значення потужності ~380 кВт (відповідає середині інтервалу зміни). В результаті реалізації цього ТР при

існуючих цінах на електроенергію в Україні (1,68 грн/кВт·год без ПДВ) річний дохід на ТЕС вірогідно може зрости на ~4,5 млн грн (напрацювання турбіни 7000 год/рік), що є непоганою стартовою умовою для продовження досліджень по застосуванню ШН покриття СЛ на ВПС.

**Висновки.** Попередня експертна оцінка впливу ШН покриттів СЛ останнього ступеня турбіни К-325-23,5 на показники якості свідчить, що зменшення втрат енергії: на тертя та схід вихрів при обтіканні сопел, механічних втрат від удару крупних крапель по РЛ, та втрат при їх обтіканні, а також витрати пари на сепарацію вологи у ступені може підвищитися на 380 кВт (1 ТР) при підвищенні на 30–50 % ресурсу останніх РЛ (данні будуть уточненні після продовження досліджень).

Наведені характеристики покриттів, а також досвід ІФТТМТ ННЦ ХФТІ з їх створення [19–21] далі планується використовувати для розробки та виготовлення зразків довговічних ШН покриттів та дослідження їх структурних властивостей.

#### Список літератури

- Шубенко А. Л., Ковальский А. Э. Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ». Сер.: Енергетичні і теплотехнічні процеси і устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2012. № 7. С. 76–87.
- Щедролюбов В. Л., Неуймин В. М., Должанский П. Р., Степанов С. В. Эрозионный износ входных кромок рабочих лопаток ЦНД мощной паровой турбины ТЭС. Сопоставление способов упрочнения. *Энергетик*. 2017. № 10. С. 40–44.
- Тищенко В. А., Алексеев Р. А. Моделирование процессов образования и движения водяной пленки и эрозионно-опасных капель в проточных частях паровых турбин. *Теплоэнергетика*. 2019. № 11. С. 72–81.
- Plondke A. C. *Droplet Characterization in the Wake of Steam Turbine Cascades. Graduate School, Master's Thesis*. Knoxville: University of Tennessee, 2012. 78 p.
- Медников А. Ф. *Определение длительности инкубационного периода процесса каплеударной эрозии рабочих лопаток последних ступеней проектируемых паровых турбин большой мощности: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные установки»*. Москва, 2012. 20 с.
- Cai X., Ning D., Yu J., Li J., Ma L., Tian C., Gao W. Coarse water in low-pressure steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2014. Vol. 228, iss. 2. P. 153–167. doi: 10.1177/2F0957650913518767
- Zhou W., Cai X., Ji X. Influence of blade surface super-hydrophilic and super-hydrophobic property on formation of secondary droplets.

- Journal of Chinese Society of Power Engineering*. 2014. Iss. 4. P. 292–297.
8. Mednikov A. F., Tkhabisimov A. B., Dasaev M. R., Burmistrov A. Zilova O. Metallographic studies results of 20KH13 steel samples with textured relief, modified surface and protective coating. *EECE-2019. E3S Web of Conferences*. Vol. 140. Article number 02009. doi: 10.1051/e3sconf/201914002009
  9. Гринкруг Л. С., Ермолович С. К. Авт. св. SU 1507991 A1, СССР. *Лопатка влажнопаровой ступени турбины*. 1989.
  10. Baumann T., Melas M., Grasso P. D., Stankowski A., Olliges S., Widmer T. Patent US 20140178699 A1, United States. *Coating for turbine parts*. 2013.
  11. Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение. *Успехи химии*. 2008. Т. 77, № 7. С. 619–638.
  12. Терехин В. В. Супергидрофобная самовосстанавливающаяся абразивно-устойчивая композиция на основе наночастиц со структурой «Полистирольное ядро-SiO<sub>2</sub>-оболочка» и сшитого полиметилсилоксана. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань: ФГБОУ ВО «КНИТУ», 2016. Т. 19, № 14. С. 96–101.
  13. Liu S., Zhang X., Seeger S. Solvent-Free Fabrication of Flexible and Robust Superhydrophobic Composite Films with Hierarchical Micro/Nanostructures and Durable Self-Cleaning Functionality. *ACS applied materials & interfaces*. 2019. No. 11 (47). P. 44691–44699. doi: 10.1021/acsami.9b15318
  14. Golovin K., Boban M., Mabry J. M., Tuteja A. Designing Self-Healing Superhydrophobic Surfaces with Exceptional Mechanical Durability. *ACS applied materials & interfaces*. 2017. No. 9 (12). P. 11212–11223. doi: 10.1021/acsami.6b15491
  15. ГОСТ Р ИСО 17076-1-014 *Кожа. Определение сопротивляемости истиранию. Часть 1. Метод Табера*. Москва: Стандартинформ, 2015. 8 с.
  16. Hoshian S., Jokinen A., Franssila S. Robust hybrid elastomer/metal-oxide superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2016. Iss. 31. P. 6526–6535. doi: 10.1039/c6sm01095d
  17. Zykova A., Safonov V., Yakovin S., Dudin S., Melnikova G., Petrovskaya A., Tolstaya T., Kuznetsova T., Chizhik S. A., Donkov N. Comparative analysis of platelets adhesion to the surface of Ta-based ceramic coatings deposited by magnetron sputtering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1492. doi: 10.1088/1742-6596/1492/1/012038
  18. Li J., Li C. X., Chen Q. Y., Gao J. T., Wang G. J., Li C. J. Super-Hydrophobic Surface Prepared by Lanthanide Oxide Ceramic Deposition Through PS-PVD Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017. Iss. 26. P. 398–408. doi: 10.1007/s11666-016-0499-0
  19. Крохмаль С. А., Широков Б. М. О возможности использования металлоорганических соединений хрома для защиты деталей и технологической оснастки, используемой для работы в агрессивных средах. *Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»*. Сер.: Хімія, хімічна технологія та екологія. Харків: НТУ «ХПІ». 2007. № 32. С. 48–55.
  20. Safonov V. Plasma activated EB-deposition: different modes of arc discharge and plasma characteristics. *Вопросы атомной науки и техники*. 2017. № 5 (111). С. 65–71.
  21. Шубенко А. Л., Ковальский А. Э., Воробьев Ю. С., Картмазов Г. Н., Романенко В. Н. Влияние эрозии на основные эксплуатационные характеристики рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления мощной паровой турбины. Часть 2. Прогнозирование изменяющихся вследствие эрозионного износа вибрационных характеристик рабочей лопатки последней ступени и выбор способа ее пассивной защиты от эрозии. *Проблемы машиностроения*. 2010. Т. 13, № 1. С. 3–11.
  22. Щегляев А. В. *Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин*. Кн. 2. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 416 с.
  23. Беляев А. В. *Гидродинамические и электрокинетические течения вблизи супергидрофобных поверхностей: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07*. Москва, 2012. 125 с.
  24. Алексеева Р. Н., Бойцова Э. А. Приближенная методика определения аэродинамических потерь в веерных решетках турбинных лопаток. *Теплоэнергетика*. 1973. № 12. С. 21–24.
  25. Gose J. W., Golovin K., Boban M., Mabry J. M., Tuteja A., Perlin M., Ceccio S. L. Characterization of superhydrophobic surfaces for drag reduction in turbulent flow. *Journal Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 845. P. 560–580.
  26. Усачев К. М. *Разработка и исследование системы удаления и дробления эрозионно-опасной влаги в ступенях паровых турбин: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12*. Москва, 2019. 255 с.
  27. Шубенко А. Л., Голощапов В. Н., Стрельников И. С., Решитыко И. В. Влияние крупнодисперсной влаги на рабочие процессы влажнопаровых ступеней турбин *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2014. № 11 (130). С. 28–39.

## References (transliterated)

1. Shubenko A. L., Koval'skiy A. E. Kapleudarnaya eroziya lopatochnykh apparatov parovykh turbin. Prognozirovanie i metody zashchity [Droplet impact erosion of steam turbine blades. Forecasting and methods of protection]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI"*. Seriya: Enerhetychni i teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 7, pp. 76–87.
2. Shchedrolyubov V. L., Neuymin V. M., Dolzhanskiy P. R., Stepanov S. V. Eroziionny iznos vkhodnykh kromok rabochikh lopatok TsND moshchnoy parovoy turbiny TES. Sopotavlenie sposobov uprochneniya [Erosive wear of the input edges of the LPC rotor blades of a powerful steam turbine at TPP. Comparison of hardening methods]. *Energetik*. 2017, no. 10, pp. 40–44.
3. Tishchenko V. A., Alekseev R. A. Modelirovanie protsessov obrazovaniya i dvizheniya vodyanoy plenki i eroziionno-opasnykh kapel' v protochnykh chastyakh parovykh turbin [Modeling the processes of formation and movement of a water film and erosion-hazardous drops in the flow parts of steam turbines]. *Teploenergetika*, 2019, no. 11, pp. 72–81.
4. Plondke A. C. *Droplet Characterization in the Wake of Steam Turbine Cascades. Graduate School, Master's Thesis*. Knoxville, University of Tennessee Publ., 2012. 78 p.
5. Mednikov A. F. *Opredelenie dlitel'nosti inkubatsionnogo perioda protsessy kapleudarnoy erozii rabochikh lopatok poslednikh stupeny proektiruemykh parovykh turbin bol'shoy moshchnosti: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 05.04.12 "Turbomashiny i kombinirovannyye ustanovki"* [Determination of the duration of the incubation period of the droplet impact erosion of the working blades of the last stages of the designed high-power steam turbines. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.04.12 "Turbomachines and combined plants"]. Moscow, 2012. 20 p.
6. Cai X., Ning D., Yu J., Li J., Ma L., Tian C., Gao W. Coarse water in low-pressure steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2014, vol. 228, issue 2, pp. 153–167. doi: 10.1177/2F0957650913518767
7. Zhou W., Cai X., Ji X. Influence of blade surface super-hydrophilic and super-hydrophobic property on formation of secondary droplets. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*. 2014, issue 4, pp. 292–297.
8. Mednikov A. F., Tkhabisimov A. B., Dasaev M. R., Burmistrov A. Zilova O. Metallographic studies results of 20KH13 steel samples with textured relief, modified surface and protective coating. *EECE-2019. E3S Web of Conferences*. Vol. 140. Article number 02009. doi: 10.1051/e3sconf/201914002009
9. Grinkrug L. S., Ermolovich S. K. *Lopatka vlahnparovoy stupeni turbiny* [Wet steam turbine blade]. Patent USSR, no. SU 1507991 A1, 1989.
10. Baumann T., Melas M., Grasso P. D., Stankowski A., Olliges S., Widmer T. *Coating for turbine parts*. Patent US, no. US 20140178699 A1, 2013.
11. Boynovich L. B., Emel'yanenko A. M. Gidrofobnye materialy i pokrytiya: printsipy sozdaniya, svoystva i primenenie [Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications]. *Uspekhi khimii*, 2008, vol. 77, no. 7, pp. 619–638.
12. Terekhin V. V. Supergidrofobnaya samovostanavlivayushchayasya abrazivno-ustoychivaya kompozitsiya na osnove nanochastits so strukturoy "Polistirol'noe yadro-SiO<sub>2</sub>-obolochka" i sshitogo polimetilsiloksana [Superhydrophobic self-healing abrasive-resistant composition based on nanoparticles with the structure "Polystyrene core-SiO<sub>2</sub>-shell" and cross-linked polymethylsiloxane]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. Kazan, FGBOU VO "KNITU" Publ.,



- 2016, vol. 19, no. 14, pp. 96–101.
13. Liu S., Zhang X., Seeger S. Solvent-Free Fabrication of Flexible and Robust Superhydrophobic Composite Films with Hierarchical Micro/Nanostructures and Durable Self-Cleaning Functionality. *ACS applied materials & interfaces*. 2019, no. 11 (47), pp. 44691–44699. doi: 10.1021/acsami.9b15318
  14. Golovin K., Boban M., Mabry J. M., Tuteja A. Designing Self-Healing Superhydrophobic Surfaces with Exceptional Mechanical Durability. *ACS applied materials & interfaces*. 2017, no. 9 (12), pp. 11212–11223. doi: 10.1021/acsami.6b15491
  15. GOST R ISO 17076-1-014 Kozha. Opredelenie soprotivlyaemosti istiraniyu. Chast' 1. Metod Tabera [State Standard 17076-1-014. Leather. Determination of abrasion resistance. Part 1. Taber method]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 8 p.
  16. Hoshian S., Jokinen V., Franssila S. Robust hybrid elastomer/metal-oxide superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2016, issue 31, pp. 6526–6535. doi: 10.1039/c6sm01095d
  17. Zykova A., Safonov V., Yakovlev S., Dudin S., Melnikova G., Petrovskaya A., Tolstaya T., Kuznetsova T., Chizhik S. A., Donkov N. Comparative analysis of platelets adhesion to the surface of Ta-based ceramic coatings deposited by magnetron sputtering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1492. doi: 10.1088/1742-6596/1492/1/012038
  18. Li J., Li C. X., Chen Q. Y., Gao J. T., Wang J., Yang G. J., Li C. J. Super-Hydrophobic Surface Prepared by Lanthanide Oxide Ceramic Deposition Through PS-PVD Process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017, issue 26, pp. 398–408. doi: 10.1007/s11666-016-0499-0
  19. Krokhmal' S. A., Shirokov B. M. O vozmozhnosti ispol'zovaniya metalloorganicheskikh soedineniy khroma dlya zashchity detaley i tekhnologicheskoy osnastki, ispol'zuemoy dlya raboty v agressivnykh sredakh [On the possibility of using organometallic chromium compounds for the protection of parts and technological equipment used for work in aggressive environments]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPI". Seriya: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ekolohiya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 32, pp. 48–55.
  20. Safonov V. Plasma activated EB-deposition: different modes of arc discharge and plasma characteristics. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 2017, no. 5 (111), pp. 65–71.
  21. Shubenko A. L., Koval'skiy A. E., Vorob'ev Yu. S., Kartmazov G. N., Romanenko V. N. Vliyanie erozii na osnovnye ekspluatatsionnye kharakteristiki rabochey lopatki posledney stupeni tsilindra nizkogo davleniya moshchnoy parovoy turbiny. Chast' 2. Prognozirovaniye izmenyayushchikhsya vsledstvie erozionnogo iznosa vibratsionnykh kharakteristik rabochey lopatki posledney stupeni i vybor sposoba ee passivnoy zashchity ot erozii [Influence of erosion on the main operational characteristics of the last stage rotor blade of a low-pressure cylinder of a powerful steam turbine. Part 2. Prediction of the vibration characteristics of the last stage rotor blade changing due to erosion wear and the choice of the method of its passive protection against erosion.]. *Problemy mashinostroeniya*. 2010, vol. 13, no. 1, pp. 3–11.
  22. Shcheglyayev A. V. *Parovye turbiny. Teoriya teplovogo protsessa i konstruktivnykh turbin. Kn. 2* [Steam turbines. Theory of the thermal process and turbine design. Book 2]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993. 416 p.
  23. Belyaev A. V. *Gidrodinamicheskie i elektrokineticheskie techeniya vblizi supergidrofobnykh poverkhnostey: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk 01.04.07* [Hydrodynamic and electrokinetic flows near superhydrophobic surfaces. Candidate phys.-math. sci. diss. (Ph. D.)]. Moscow, 2012. 125 p.
  24. Alekseeva R. N., Boytsova E. A. Priblizhennaya metodika opredeleniya aerodinamicheskikh poter' v veerlykh reshetkakh turbinnykh lopatok [Approximate method for determining aerodynamic losses in fan-shaped cascades of turbine blades]. *Teploenergetika*. 1973, no. 12, pp. 21–24.
  25. Gose J. W., Golovin K., Boban M., Mabry J. M., Tuteja A., Perlin M., Ceccio S. L. Characterization of superhydrophobic surfaces for drag reduction in turbulent flow. *Journal Fluid Mechanics*. 2018, vol. 845, pp. 560–580.
  26. Usachev K. M. *Razrabotka i issledovanie sistemy udaleniya i drobleniya erozionno-opasnoy vlagi v stupenyakh parovykh turbin: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.04.12* [Development and research of a system for the removal and crushing of erosive moisture in the stages of steam turbines. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Moscow, 2019. 255 p.
  27. Shubenko A. L., Goloshchapov V. N., Strel'nikov I. S., Reshit'ko I. V. Vliyanie krupnodispersnoy vlagi na rabochie protsessy vlahneparovykh stupeney turbin [Influence of coarse moisture on the working processes of humid steam stages of turbines]. *Energobezpechenie. Energetika. Energoaudit*. 2014, no. 11 (130), pp. 28–39.

Надійшла (received) 04.11.2020

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шубенко Олександр Леонідович (Шубенко Александр Леонидович, Shubenko Olexsandr)** – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, завідувач відділу оптимізації процесів і конструкції турбомашин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9014-1357>; e-mail: [shuben@ipmach.kharkov.ua](mailto:shuben@ipmach.kharkov.ua)

**Сафонов Володимир Йосипович (Сафонов Владимир Иосифович, Safonov Volodymyr)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут», співробітник лабораторії плазмохімічних процесів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8146-2562>; e-mail: [v\\_safonov@kipt.kharkov.ua](mailto:v_safonov@kipt.kharkov.ua)

**Бабак Микола Юрійович (Бабак Николай Юрьевич, Babak Mikola)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, співробітник відділу оптимізації процесів і конструкції турбомашин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4281-2790>; e-mail: [babak@ipmach.kharkov.ua](mailto:babak@ipmach.kharkov.ua)

**Сенецький Олександр Володимирович (Сенецкий Александр Владимирович, Senetskiy Olexsandr)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, співробітник відділу оптимізації процесів і конструкції турбомашин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8146-2562>; e-mail: [aleksandr-seneckij@ukr.net](mailto:aleksandr-seneckij@ukr.net)

**Євич Микола Леонідович (Евич Николай Леонидович, Evich Mikola)** – кандидат фізико-математичних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, співробітник відділу оптимізації процесів і конструкції турбомашин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6516-4394>; e-mail: [yevich@ipmach.kharkov.ua](mailto:yevich@ipmach.kharkov.ua)

**Бояршинов Олексій Юрійович (Бояршинов Алексей Юрьевич, Boyarshinov Olexsii)** – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, співробітник відділу оптимізації процесів і конструкції турбомашин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3412-3212>; e-mail: [boiarshunov@ipmach.kharkov.ua](mailto:boiarshunov@ipmach.kharkov.ua)