

УДК 629.7.048.7(045)

О.І. Хлистун, к.т.н., доц.

## АНАЛІЗ КОАГУЛЯЦІЇ КРАПЕЛЬ ВОДИ НА ВИХОДІ АВІАЦІЙНОЇ ТУРБОХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Національний авіаційний університет  
E-mail: ggsp@nau.edu.ua

*Отримано розрахункові залежності для аналізу процесу перетворення дрібнодисперсного аерозолу води на виході охолоджувальної турбіни в суцільний шар рідини.*

*The calculating expressions for analysis of transformation of the aircraft cooling turbine outlet fine-disperse water aerosol into the continuous layer of liquid are obtained.*

*Получены расчетные зависимости для проведения анализа процесса превращения мелкодисперсной аэрозоли воды на выходе охлаждающей турбины в сплошной жидкий слой.*

### Вступ

Під час кондиціонування повітря в кабіні літака на землі та в польоті на малих висотах в умовах жаркого вологого клімату на виході турбоохолодильної установки утворюється значна кількість конденсату води.

Для запобігання потрапляння цього конденсату на елементи конструкції та безпосередньо в зони перебування людей у кабіні, а також у блоки електронного обладнання, турбоохолодильні блоки охолодження обладнують спеціальними вологовідокремлювачами [1–4].

Конденсат води на виході охолоджувальної турбіни має дрібнодисперсну структуру, відокремити дрібні краплі води створенням відцентрових сил не вдається, тому в конструкції вологовідокремлювачів на виході охолоджувальних турбін установлюють коагулювальні пристрої (рис. 1).

Коагулювальні пристрої містять дрібно-вічкову сітку, у порах якої краплі затримуються і, з'єднуючись, утворюють плівку води. Далі плівка зривається потоком повітря й перетворюється на досить великі краплі, які легко відокремити відцентровими силами.

У системах кондиціонування повітря сучасних літаків відокремлення води здійснюється також на вході в турбіну попереднім охолодженням стисненого вологого повітря [2; 3].

Однак такі конструктивні заходи щодо відокремлення вологи недостатньо ефективні в жарких умовах із особливо підвищеною вологістю. У цих умовах спостерігається досить інтенсивне утворення скрапленої води в роздавальних трубопроводах системи вентиляції та її витікання у внутрішні зони кабіни літака, що неприпустимо під час експлуатації.

Таким чином, аналіз процесу коагуляції дрібнодисперсних крапель води по довжині вентиляційних трубопроводів кабіни повітряних суден і розрахунок характеристик її інтенсивності для розроблення засобів для захисту кабіни від потрапляння води, що генерується в системі кондиціонування повітря, становить значну наукову проблему, яка має важливе прикладне значення для забезпечення експлуатації повітряних суден у регіонах із жарким вологим кліматом.

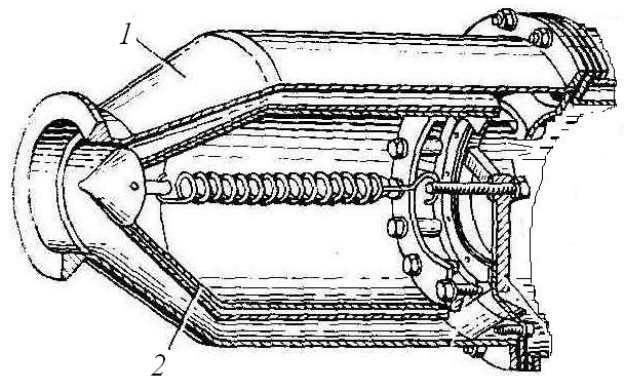


Рис. 1. Коагулятор вологовідокремлювача:  
1 – корпус;  
2 – сітчастий коагулятор

У літературних джерелах [1–4; 6] немає описання механізму коагуляції та не наведено розрахункових залежностей для аналізу конструктивних рішень щодо коагулювальних пристроїв вологовідокремлювачів.

Питанням формування умов щодо вологості в герметичних кабінах атмосферних літаків, а також аналізу причин, які призводять до конденсації пари води на внутрішніх поверхнях герметичних кабін? присвячено статтю [7].

**Мета** роботи – розв’язання задачі математичного моделювання процесу коагуляції дрібнодисперсних крапель конденсату води на стінках трубопроводів.

### Постановка задачі

Будемо розглядати потік вологого повітря в трубопроводі на виході авіаційної турбоохолодильної установки (рис. 2).

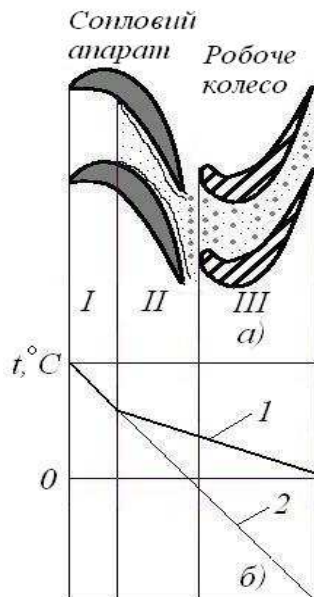


Рис. 2. Схема утворення аерозольного конденсату води (а), та характер змінення температури (б) в проточній частині охолоджувальної реактивної турбіни:  
 I – ділянка сухої пари;  
 II – ділянка утворення дрібнодисперсного аерозольного конденсату та плівки води;  
 III – ділянка утворення крупнодисперсного аерозолю;  
 1 – вологе повітря;  
 2 – сухе повітря

Особливістю конденсації пари води під час подачі на охолоджувальну турбіну вологого повітря є те, що зі зниженням температури у сопловому апараті краплі води утворюються на частинках пилу, які є в повітрі. Розмір цих аерозольних крапель становить 0,5...1,5 мкм.

У міру зниження температури в охолоджувальній турбіні вся надлишкова волога перетворюється на нові аерозольні краплі, збільшується їх концентрація [3]. Аерозольні краплі, сформовані в охолоджувальній турбіні, мають малу інерцію та майже не відкладаються на твердих поверхнях.

На основі вивчення механізму коагуляції дрібнодисперсних крапель води за наявності твердих граней отримаємо розрахункові залежності для проведення аналізу процесу виділення скрапленої води з дрібнодисперсного аерозолю на виході охолоджувальної турбіни. Оцінимо інтенсивність формування скрапленої води в трубопроводах системи вентиляції на виході турбоохолодильної установки літака місцевих повітряних ліній в умовах жаркого вологого клімату.

### Розрахункова модель

На виході охолоджувальної турбіни потік вологи за наявності твердої поверхні має дві фази – водяну пару і воду [4].

Рідинна фаза складається із дрібнодисперсних аерозольних крапель і плівки, яка рухається вздовж стінки (рис. 3).

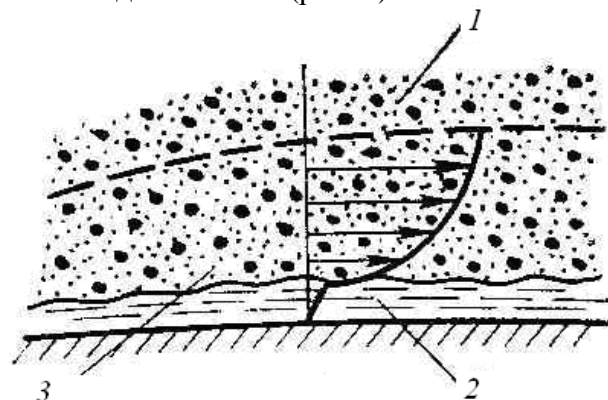


Рис. 3. Структура потоку вологого повітря поблизу стінки:

- 1 – основний парокраплинний потік;
- 2 – плівка води, яка вкриває стінку;
- 3 – парокраплинний примежовий шар

У ділянці прилежого шару 2 за рахунок процесів перенесення і міжмолекулярної взаємодії дрібнодисперсні краплини перетворюються на плівку води.

Для отримання розрахункової моделі будемо використовувати такі припущення:

– аерозоль конденсату води має суцільну структуру і відслідковує рух потоку повітря, який його містить;

– потік повітря з аерозолем є турбулентним, його швидкість має рівномірний профіль по перерізу трубопроводу;

– поперечний рух краплин конденсату відбувається за рахунок турбулентного перенесення;

– геометричні та кінематичні характеристики потоку аерозолем у напрямку руху залишаються незмінними;

– плівка води вздовж стінки має товщину, якою можна знехтувати;

– змінення концентрації аерозолем не впливає на швидкість потоку повітря.

### Математична модель

Для отримання математичної моделі процесу коагуляції аерозолем конденсату води скористаємося транспортною теоремою Рейнольдса [8].

Будемо розглядати фіксований контрольний об'єм, який пов'язаний із трубопроводом, і систему аерозолем, яка рухається через контрольний об'єм (рис. 4).

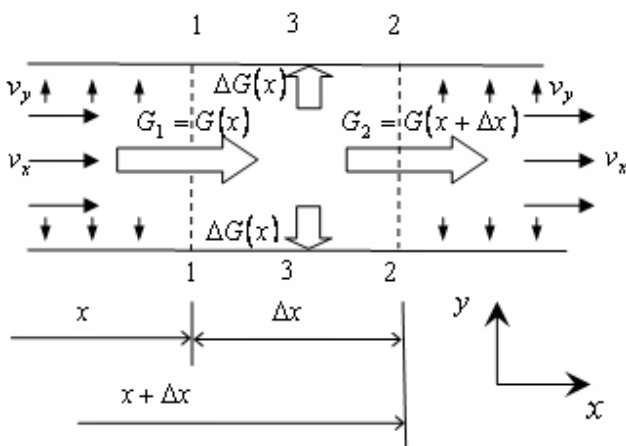


Рис. 4. Математичний опис процесу коагуляції аерозольного конденсату води в трубопроводі на виході турбоохолодильної установки

Для визначення аерозолем води і її змінення під час руху аерозолем всередині контрольного об'єму використаємо транспортну теорему Рейнольдса:

$$\frac{DM_{\text{sys}}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{W_c} \rho dW + \int_{A_c} \rho \mathbf{V} \hat{n} dA, \quad (1)$$

де  $\frac{DM_{\text{sys}}}{Dt}$  – змінення з часом маси системи

аерозолем  $M_{\text{sys}}$ , яка займає об'єм  $W_s$ ,

$\frac{D(\ )}{Dt}$  – повна (субстанційна) похідна):

$$M_{\text{sys}} = \int_{W_s} \rho dW;$$

$\rho$  – густина аерозолем;

$W$  – об'ємна втрата;

$\frac{\partial (\int_{W_c} \rho dW)}{\partial t}$  – змінення з часом маси

аерозолем всередині контрольного об'єму  $W_c$ ;

$\int_{A_c} \rho \mathbf{V} \hat{n} dA$  – потік маси аерозолем крізь поверхню контрольного об'єму  $A_c$ ;

$\mathbf{V}$  – вектор швидкості потоку через нескінченно малу площадку  $dA$  поверхні контрольного об'єму;

$\hat{n}$  – одиничний вектор нормалі до площадки  $dA$ ;

$A$  – площа поверхні.

Відповідно до принципу збереження маси маємо:

$$\frac{DM_{\text{sys}}}{Dt} = 0.$$

Якщо потік сталий, маса всередині контрольного об'єму не змінюється:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{W_c} \rho dW = 0,$$

рівняння (1) перетворюється так:

$$\int_{A_c} \rho \mathbf{V} \hat{n} dA = 0, \quad (2)$$

У розглядуваному випадку можна виокремити три поверхні контрольного об'єму: дві поверхні уявних перерізів 1 і 2, через які аерозоль конденсату води надходить до

контрольного об'єму й залишає його з потоком повітря, і поверхню бокової стінки 3, на якій аерозоль перетворюється на плівку води.

Інтеграл у рівнянні (2) розпадається на три інтеграли на поверхнях вхідного та вихідного перерізів і боковій поверхні контрольного об'єму:

$$-\int_{A_n} \rho_1 v_x dA + \int_{A_n} \rho_2 v_x dA + \int_{A_t} \rho v_y dA = 0, \quad (3)$$

де  $v_x, v_y$  – поздовжня і поперечна компоненти швидкості потоку (постійні величини за припущенням);

$A_n, A_t$  – площі поверхонь поперечного перерізу та бокової стінки контрольного об'єму.

Два перші інтеграли у рівнянні (3) визначають витрати аерозолу через вхідний і вихідний перерізи контрольного об'єму, а третій інтеграл характеризує інтенсивність перетворення краплин аерозолу на плівку води. Знак мінус відповідає потоку аерозолу конденсату, який надходить до контрольного об'єму, а знак плюс – потоку, який залишає контрольний об'єм. Для вхідного і вихідного перерізів контрольного об'єму за припущенням густина і швидкість мають постійні значення на їх поверхнях:

$$\int_{A_n} \rho_1 v_x dA = \rho_1 v_x A_n = G_1,$$

$$\int_{A_n} \rho_2 v_x dA = \rho_2 v_x A_n = G_2.$$

З урахуванням цього рівняння (3) можна записати у вигляді

$$G_2 - G_1 = -\int_{A_t} \rho v_y dA. \quad (4)$$

За визначенням густина аерозолу крапель води у малому об'ємі  $\delta W$  становить:

$$\rho = \frac{\delta m}{\delta W}, \quad (5)$$

де  $\delta m$  – маса аерозолу в об'ємі  $\delta W$ .

Для потоку рідини масу  $\delta m$  можна визначити через витрату аерозолу, який надходить до контрольного об'єму за малий час  $\delta t$ :

$$\delta m = G \delta t = G \frac{\delta x}{v_x}. \quad (6)$$

Оскільки  $\delta W = A_n \delta x$ , з урахуванням рівняння (6) вираз (5) можна подати так:

$$\rho = \frac{G \frac{\delta x}{v_x}}{A_n \delta x} = \frac{G}{v_x A_n}.$$

Для бокової поверхні контрольного об'єму

$$dA = P dx;$$

$$A_t = P(x_2 - x_1),$$

де  $P$  – периметр.

Тоді рівняння (4) може бути таким:

$$G_2 - G_1 = -\int_{x_1}^{x_2} G \frac{v_y}{v_x} \frac{P}{A_n} dx,$$

або в диференціальній формі маємо:

$$dG = -G \frac{v_y}{v_x} \frac{P}{A_n} dx. \quad (7)$$

У рівнянні (7) величину відношення компонент швидкості  $v_y/v_x$  можна розглядати як таку, що пропорційна ступеню турбулентності несучого потоку повітря у напрямку  $y$ ,  $v_y/v_x \sim v'_y$ .

Із визначення гідравлічного діаметра

$$d_h = \frac{4A_n}{P},$$

можна записати:

$$\frac{P}{A_n} = \frac{4}{d_h}.$$

Таким чином, після розділення змінних диференціальне рівняння (7) можна подати у вигляді:

$$\frac{dG}{G} = -a v'_y \frac{4}{d_h} dx, \quad (8)$$

де  $a$  – коефіцієнт пропорційності.

Для сталого несучого потоку повітря через контрольний об'єм постійного гідравлічного діаметра рівняння (8) можна проінтегрувати таким чином:

$$\int_{G_0}^{G_L} \frac{dG}{G} = -k_c \int_0^L dx, \quad (9)$$

де  $G_0, G_L$  – витрати аерозолу конденсату на вході та на виході трубопроводу;

$L$  – довжина трубопроводу;

$k_c$  – стала величина, яка характеризує інтенсивність коагуляції аерозолі конденсату води:

$$k_c = \frac{4av'_y}{d_h}$$

З рівняння (9) після інтегрування отримаємо:

$$\ln G_L = \ln G_0 - k_c L;$$

$$G_L = G_0 e^{-k_c L}. \quad (10)$$

Вираз (10) дає нам функцію змінення витрати аерозолі конденсату води по довжині трубопроводу на виході охолоджувальної турбіни.

Із рівняння (10) можна отримати вирази для визначення:

– витрати аерозолі конденсату води, яка коагулюється на стінках трубопроводу поміж вхідним і вихідним перерізами трубопроводу:

$$W_L = G_0 - G_L = G_0 (1 - e^{-k_c L}); \quad (11)$$

– відносної витрати аерозолі конденсату води на виході трубопроводу:

$$\frac{G_L}{G_0} = e^{-k_c L}.$$

– довжини трубопроводу, яка забезпечує задану відносну витрату аерозолі конденсату води на виході трубопроводу:

$$L = -\frac{1}{k_c} \ln(G_L/G_0). \quad (12)$$

Розрахункову оцінку інтенсивності формування скрапленої води в трубопроводі на виході турбоохолодильної установки проведено для сучасного літака місцевих повітряних ліній в умовах жаркого вологого клімату за такими вихідними даними:

1) атмосферні умови:

– температура

$$t_{h0} = 42^\circ\text{C};$$

– відносна вологість

$$\Phi_{h0} = 82\%;$$

– барометричний тиск

$$p_{h0} = 101,325 \text{ кПа};$$

– тиск насиченої пари води [5]:

$$p_{ss0} = 479 + (11,52 + 1,62t_{h0})^2,$$

$$p_{ss0} = 6,81 \text{ кПа};$$

– вологість сухого повітря

$$d_{h0} = 0,62 \frac{\Phi_{h0}}{100} \frac{p_{ss0}}{p_{h0} - p_{ss0}},$$

$$d_{h0} \cdot 10^3 = 36,7 \text{ г/кг}_{\text{с.п.}};$$

2) вихід охолоджувальної турбіни:

– витрата повітря

$$G_c^{\text{nom}} = 570,6 \text{ кг/год},$$

$$G_c^{\text{max}} = 715,3 \text{ кг/год};$$

– температура

$$t_c = 12^\circ\text{C};$$

– вологість, (за діаграмою вологого повітря)

$$d_c = 9 \text{ г/кг}_{\text{с.п.}};$$

– витрата сконденсованої води

$$W_c^{\text{nom}} = 15,8 \text{ кг/год},$$

$$W_c^{\text{max}} = 19,8 \text{ кг/год};$$

– оціночна ефективність вологовідокремлювача,

$$\eta = 30\%;$$

3) трубопровід на виході охолоджувальної турбіни

– овальна форма;

– площа перерізу

$$F = 0,005 \text{ м}^2;$$

– периметр

$$P = 0,382 \text{ м};$$

– гідравлічний діаметр

$$d_h = 4F/P, \quad d_h = 0,0523 \text{ м};$$

– довжина трубопроводу

$$L_r = 1,2 \text{ м}.$$

За наведеними даними для літака місцевих повітряних ліній із використанням отриманої математичної моделі та розрахункових залежностей проведено кількісну оцінку перетворення частинок аерозолі води у скоагульовану фракцію води в трубопроводі на виході турбоохолодильної установки.

Оцінку витрати скоагульованої води визначено за формулою (11) в трубопроводі на виході турбіни (табл. 1, рис. 5).

Таблиця 1

Витрата скоагульованої води  $W_L$ 

Ступінь турбулентності, %	$W_L$ , л/год	
	ном	max
4	10,80	13,5
8	11,07	13,84
12	11,08	13,85
16	11,08	13,85
20	11,08	13,85

Залежність витрати скоагульованої води від ступеня турбулентності потоку, яка показує, що кількість води, яка конденсується в трубопроводі на виході турбіни не залежить від ступеня турбулентності потоку повітря.

Довжину трубопроводу, яка потрібна для забезпечення заданої відносної витрати аерозолу води на виході трубопроводу визначено за формулою (12) для можливих ступенів турбулентності потоку (рис. 6). Для розрахунків використано значення  $d_h = 0,0523$  м (табл. 2).

Таблиця 2

Довжина трубопроводу  $L$   
залежно від заданої відносної витрати  
аерозолу води на виході трубопроводу ( $G_L/G_0$ )  
і ступеня турбулентності  $v'_y$ , м

Ступінь турбулентності, %	Відносна витрата аерозолу, %					
	2,5	5	7,5	10	12,5	15
4	1,21	0,98	0,85	0,75	0,68	0,62
8	0,60	0,49	0,42	0,38	0,34	0,31
12	0,40	0,33	0,28	0,25	0,23	0,21
16	0,30	0,24	0,21	0,19	0,17	0,16
20	0,24	0,20	0,17	0,15	0,14	0,12

Отримані дані показують, що на довжину трубопроводу, яка забезпечує задану відносну витрату аерозолу суттєвий вплив, має ступінь турбулентності потоку повітря. Особливо цей вплив відчутний під час переходу від відносно малих значень турбулентності (4%) до 12–20%. При цьому потрібна довжина трубопроводу змінюється в 3–5 рази.

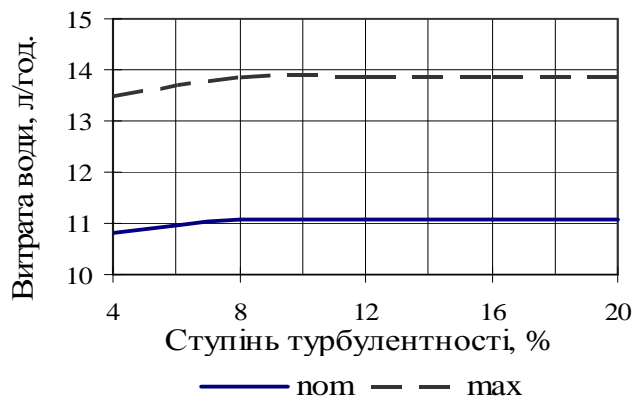


Рис. 5. Витрата скоагульованої води у трубопроводі на виході турбоохолодильної установки

Отримана розрахункова залежність для оцінювання змінення масової частини рідинової фази, яка має структуру аерозолу, в потоці вологого повітря на виході охолоджувальної турбіни по довжині трубопроводу має вигляд загасальної експоненти (формула 10). Загасальна експонента описує численні процеси, які відбуваються в природі й техніці та пов'язані зі втратою речовини або енергії.

Отже, отримані залежності для дослідження розглянутого процесу коагуляції відповідають логіці розвитку процесів із втратою речовини або енергії.

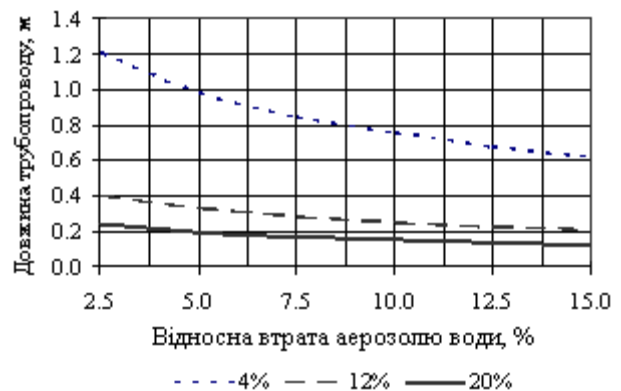


Рис. 6. Довжина трубопроводу, яка забезпечує задану відносну витрату аерозолу води для можливих ступенів турбулентності потоку

Вираз для визначення сталої загасання експоненти  $k_c$ , яка характеризує інтенсивність коагуляції аерозолу конденсату води, отримано на основі того, що коагуляція відбувається на стінках трубопроводу й вона зумовлена попереочним перенесенням аерозолу.

Коефіцієнт пропорційності  $a$  у виразі для сталої загасання доцільно визначати за даними експериментальних досліджень. Під час застосування отриманої моделі припускали  $a = 1$ .

### Висновки

1. Отримано математичний опис і розрахункові залежності для аналізу процесу перетворення дрібнодисперсного аерозолі води на виході охолоджувальної турбіни в суцільний шар рідини на основі вивчення механізму коагуляції дрібнодисперсних крапель води за наявності твердих граней.

Знайдено розрахункову залежність для оцінювання змінення масової частини дрібнодисперсного аерозолі води по довжині трубопроводу на виході охолоджувальної турбіни, яка має вигляд загасальної експоненти.

Установлено, що стала загасання експоненти, яка характеризує інтенсивність коагуляції аерозолі конденсату води, визначається ступенем турбулентності потоку, який переносить аерозоль, і гідравлічним діаметром трубопроводу.

2. Оцінено інтенсивність формування скрапленої води в трубопроводах системи вентиляції на виході турбоохолоджувальної установки літака місцевих повітряних ліній для умов жаркого вологого клімату.

Установлено, що основна частина дрібнодисперсного аерозолі води може бути скоагулюваною на стінках вихідного трубопроводу охолоджувальної турбіни ще до надходження у роздавальні короби кабіни літака.

### Література

1. *Воронин Г.И.* Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования / Г.И. Воронин. – М.: Машиностроение, 1978. – 543 с.
2. *Горбачев М.В.* Термодинамический анализ реальных циклов систем кондиционирования воздуха с двухкратной регенерацией / М.В. Горбачев, Ю.В. Дьяченко // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2008. – №1. – С. 41–50.
3. *Дьяченко Ю.В.* Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов / Ю.В. Дьяченко, В.А. Спарин, А.В. Чичиндаев. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 512 с.
4. *Системы* оборудования летательных аппаратов / под ред. А.М. Матвиенко. – М.: Машиностроение, 1995. – 368 с.
5. *Богословский В.Н.* Кондиционирование воздуха и холодоснабжение / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
6. *Дейч М.Е.* Гидрогазодинамика / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
7. *Хлистул О.І.* Умови захисту ліхтаря повітряного судна від конденсації вологи / О.І. Хлистул // *Вісник НАУ*. – 2004. – №1(19). – С. 118–121.
8. *Munson B.R.* Fundamentals of fluid mechanics. 4th edition / B.R. Munson, D.F. Young, T.H. Okiishi. – John Wiley & Sons, Inc, 2002. – 840 p.

Стаття надійшла до редакції 18.05.10.