

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-02>

УДК: 621.183

Волошанюк Олександр Якович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-0484-9111>

Черкаський державний технологічний університет

## МАТЕМАТИЧНИЙ АСПЕКТ ПРОДУКТИВНОСТІ ДІЇ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

**Волошанюк О. Я. Математичний аспект продуктивності дії редукційно-охолоджувальних установок.** Розкрито поняття редукційно-охолоджувальної установки та пароохолоджувача. Здійснено визначення головних складових процесу зниження тиску та температури пари, що використовується. Наведено схему редукційно-охолоджувальної установки з детальним описом всіх складових та відокремленням потоків охолоджуючої води та свіжої пари. Також зазначено вхідні значення тиску та температури, що задаються на початку роботи редукційно-охолоджувальної установки. Описано алгоритм охолодження із зазначенням всіх компонентів. Розкрито рівень надійності редукційно-охолоджувальної установки та підкреслено основні негативні впливи, що відбуваються під час дії редукційно-охолоджувальної установки. Підкреслено, що ефективність редукційно-охолоджувальної установки, рівень її продуктивної дії лежить в основі ексергії. Наведено математичне обґрунтування продуктивності дії редукційно-охолоджувальних установок. Запропоновано рівняння ексергетичного балансу для редукційно-охолоджувальної установки та схема ексергетичних потоків редукційно-охолоджувальної установки. Відокремлено рівняння теплового балансу редукційно-охолоджувальної установки та матеріального балансу. Наведено формулу для визначення витрати гострої пари та обчислення витрати охолоджуючої води. Окремо відокремлено параметри, які використовуються при аналізі функціонування редукційно-охолоджувальної установки.

**Ключові слова:** Редукційно-охолоджувальна установка, продуктивність, енерговиробництво, температура, пароохолоджувач, пара, ексергія, конденсат, потік, ентропія, ентальпія, матеріальний баланс.

**Волошанюк А. Я. Математический аспект производительности действия редукционно-охлаждающих установок.** Раскрыто понятие редукционно-охлаждающей установки и пароохладителя. Осуществлено определение главных составляющих процесса снижения давления и температуры пара, который используется. Приведена схема редукционно-охлаждающей установки с подробным описанием всех составляющих и разделением потоков охлаждающей воды и свежего пара. Также отмечено входные значения давления и температуры, задаваемые в начале работы редукционно-охлаждающей установки. Описан алгоритм охлаждения с указанием всех компонентов. Раскрыто уровень надежности редукционно-охлаждающей установки и подчеркнута основные негативные воздействия, происходящие во время действия редукционно-охлаждающей установки. Указано, что эффективность редукционно-охлаждающей установки, уровень ее продуктивного действия лежит в основе эксергии. Приведено математическое обоснование производительности действия редукционно-охлаждающих установок. Предложено уравнение эксергетического баланса для редукционно-охлаждающей установки и схема эксергетических потоков редукционно-охлаждающей установки. Обособленно уравнение теплового баланса редукционно-охлаждающей установки и материального баланса. Приведена формула для определения расхода острого пара и вычисления расхода охлаждающей воды. Выделены отдельно параметры, используемые при анализе функционирования редукционно-охлаждающей установки.

**Ключевые слова:** Редукционно-охлаждающая установка, производительность, энергопроизводство, температура, паро-охладитель, пара, эксергия, конденсат, поток, энтропия, энтальпия, материальный баланс.

**Voloshaniuk O. Y. Mathematical aspect of the performance of the action of the reduction-cooling plants.** The concept of a reduction-cooling unit and a desuperheater is disclosed. The determination of the main components of the process of reducing the pressure and temperature of the steam used has been carried out. The diagram of the reduction-cooling unit with a detailed description of all components and the separation of the cooling water and live steam flows is given. Also marked are the input pressure and temperature values set at the start of the reduction and cooling unit. The cooling algorithm is described with an indication of all components. The level of reliability of the reduction-cooling unit is disclosed and the main negative impacts that occur during the operation of the reduction-cooling unit are emphasized. It is indicated that the efficiency of the reduction-cooling unit, the level of its productive action underlies exergy. The mathematical substantiation of the performance of the operation of the reduction-cooling units is given. An equation of exergy balance for a reduction-cooling unit and a diagram of exergy flows of a reduction-cooling unit are proposed. Separately, the equation of the heat balance of the reduction-cooling unit and the material balance. The formula for determining the flow rate of live steam and calculating the flow rate of cooling water is given. The parameters used in the analysis of the operation of the reduction-cooling unit are highlighted separately.

**Key words:** Reduction and cooling unit, productivity, energy production, temperature, steam-cooler, steam, exergy, condensate, flow, entropy, enthalpy, material balance.

**Постановка проблеми дослідження.** Історія людського суспільства, свідчить, що одним із визначальних чинників його розвитку є ефективність і масштаби енерговиробництва. При цьому значимість цього чинника безперервно зростає з плином часу.

XX століття ввійшло в історію як століття освоєння людиною атомної енергії, принципово нового, практично невичерпного джерела енергії для успішного вирішення суспільством безперервно зростаючих потреб в енергоспоживанні. Редукційно-охолоджувальні установки відносяться до числа допоміжного обладнання електростанцій і з цієї причини до її розробки і модернізації ставляться з

істотно меншою увагою, ніж до основного обладнання. Однак, без надійного допоміжного обладнання експлуатація електростанцій взагалі неможлива. Існуючі редуційно-охолоджувальні установки вже давно не відповідають сучасному технічному рівню як по надійності, так і за економічними показниками. Низький термін служби, високий опір, підвищена вібрація і шум властиві практично всім елементам. Звідси випливають не тільки високі експлуатаційні витрати, а й часті позапланові, а іноді і аварійні зупинки основного обладнання. Особливі труднощі виникають при створенні редуційно-охолоджувальних установок, де режим роботи змінюється в дуже широких межах. Відповідно саме це обладнання найбільш часто виходить з ладу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На сьогодні, чимало сучасних науковців досліджували технічну складову редуційно-охолоджувальних установок. Ф.І. Лухтура, А.В. Пижигов, О.А. Хлестова [1] дослідили способи підвищення теплової економічності і надійності промислових теплових електростанцій, розкрили шляхи вдосконалення роботи теплових схем теплової станції, до яких віднесли оптимізацію режимів роботи існуючого обладнання станції; оптимізацію і вдосконалення із заміною котельного обладнання; установку нових, сучасних турбін, в т.ч. різні варіанти заміни на турбіни постійно діючих редуційно-охолоджувальних установок; повне заміщення теплових електростанцій з установкою парогазових і газотурбінних станцій або часткове заміщення (модернізація) теплової схеми з впровадженням в технологічну схему теплових електростанцій утилізаційних установок вторинних джерел низької потенційної теплоти, наприклад, теплових насосних установок.

В. А. Маляренко, О. Л. Шубенко, С. Ю. Андреев, М. Ю. Бабак та О. В. Сенечський [2] підійшли до вирішення важливої проблеми підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів шляхом енергозбереження. Авторами виконано аналіз стану й потенціалу розвитку світової та базової енергетики України. Показано, що значні резерви містяться у «малій» енергетиці, яка є головним споживачем паливно-енергетичних ресурсів. Розкрито енергоджерела та енергоустановки для впровадження когенерації з обґрунтуванням компонентів та їх взаємозв'язку.

Підвищення ефективності систем енергопостачання шляхом застосування когенераційних установок з турбоагрегатом дослідили Л.В. Високих, В.В. Клименко та В.І. Кравченко [3].

В.В. Клименко, В. І. Кравченко та Р. В. Телюта [4] розкрили питання організації систем рециркуляції, визначили пасивні методи енергозбереження, навели та детально описали математичну складову енергетичних балансів та їх різновидів, для кожного окремого агрегату електростанцій.

Із зарубіжних напрацювань варто відмітити роботи: Д.Н. Соловей, А.В. Поджаров [5], Т. Maurer [6], S. X. Li, J. S. Wang [7], A. Emadi [8], M. Takashi, H. Shuichi, O. Daisuke, T. Masahiko, S. Jun [9], M. El Mankibi, R. Cantin, A. Zoubir [10], F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue [11] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою даної роботи, питання систематизації та формулювання математичного аспекту продуктивності дії редуційно-охолоджувальних установок є вивченим не досконало та потребує детального опрацювання.

**Виділення раніше не вирішених частин загальної проблеми.** В умовах глобалізації сучасної наукової думки питання систематизації наукових надбань у рамках певної сфери застосувань потребує детального опрацювання. Так, математична складова дії редуційно-охолоджувальних установок є розкритою у багатьох наукових працях, проте не є систематизованою та сформованою повною мірою, тому тема даної наукової роботи є актуальною.

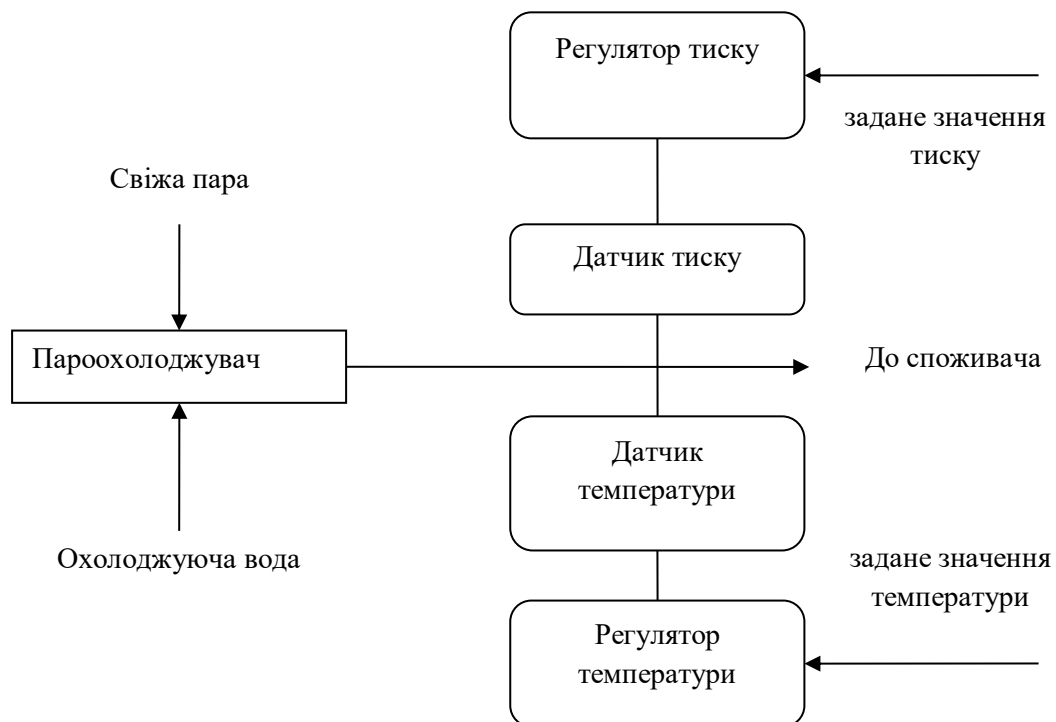
**Формулювання мети дослідження.** У рамках даної статті необхідно розкрити математичний аспект продуктивності дії редуційно-охолоджувальних установок. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно:

- дослідити схему редуційно-охолоджувальної установки;
- розкрити математичну складову ефективності редуційно-охолоджувальної установки та рівень її продуктивності із застосуванням принципів ексергетичного балансу;
- навести схему ексергетичних потоків редуційно-охолоджувальної установки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В умовах сьогодення, теплові та атомні електростанції посідають одне з головних місць по виробленню електричної енергії та потребують детального дослідження компонентного складу з метою підвищення або стабілізації продуктивності.

Важливим елементом обладнання теплових і атомних електростанцій є редукційно-охолоджувальні установки і пароохолоджувачі, від яких в значній мірі залежать надійність і час використання встановленої потужності енергоустановок. Редукційно-охолоджувальні установки застосовують, щоб знизити тиск і температуру пари. Гострий пар надходить з основного паропроводу. Його тиск знижують за рахунок дроселювання потоку через регулюючий клапан. Температура знижується за рахунок упорскування охолоджуючої води. Тиск і температура пари залежать від вимог споживачів, а також від призначення.

На рис. 1 показана схема редукційно-охолоджувальної установки, в якій свіжий пар проходить через засувку на дросельний клапан, де і знижується його тиск.



\* власна розробка автора на основі [9]

Рис. 1. Схема редукційно-охолоджувальної установки

Редукційно-охолоджувальна установка застосовується для зміни параметрів пари, що подається до ущільнень турбіни АЕС або ТЕС, а також пари, що надходить на ежектори і пароежекторні машини.

Охолоджуюча вода надходить до форсунки через водяну засувку і далі на регулюючий клапан. Установка дросельної шайби або групи дросельних шайб до клапана необхідна в разі, коли вода подається з більш високим тиском, ніж він необхідний для упорскування води. Для дросельних пристроїв розраховують таку кількість води, щоб охолодити максимально можливу витрату пари.

Щоб запобігти небезпечним граничним значенням тиску пари після редукційно-охолоджувальної установки, на вихідний паропровід встановлюється спеціальний запобіжний пристрій. Також охолоджувач пари укомплектовують захисною трубою, яка призначена для зниження негативного впливу води на стінку охолоджувача.

Традиційні редукційно-охолоджувальні установки володіють невисоким рівнем надійності, так як в них обрив дросельного клапана відбувається приблизно через 120 повних циклів навантаження, а захисна сорочка пароохолоджувача виходить з ладу приблизно через 2000 годин безперервної роботи [1]. Після її поломки корпус пароохолоджувача піддається ерозійному зносу під безпосереднім впливом струменя води, яка витікає з форсунок, через що термін його експлуатації значно скорочується. Це руйнування корпусу пароохолоджувача може супроводжуватися аварією і нещасним випадком [1]. Пароохолоджувач редукційно-охолоджувальної установки є дорогим конструктивним

вузлом, складним в ремонті, так як навіть заміна захисної сорочки в ньому є важко здійсненним фактом.

Як відомо, основні недоліки традиційних пароохолоджувальних і редуційно-охолоджувальних пристроїв викликані використанням в них способом зниження параметрів пари, в першу чергу його температури.

Цей спосіб полягає в тому, що для охолодження пари в її потік впорскується у вигляді крапель охолоджуюча вода, причому цей принцип використовується як в пароохолоджувачі, так і в редуційно-охолоджувальній установці (як при роздільному, так і при змішаному дроселюванні і охолодженні пари). Час випаровування крапель невелика, але так як швидкість потоку пари доходить до сотень метрів в секунду, то її досить, щоб краплі пролетіли разом з паром значну відстань (до десятків метрів). Звідси неминучий винос охолоджуючої води з пароохолоджувача у паропровід і пов'язаний з цим термошок металу в місцях, куди періодично потрапляє вода. Це призводить до пошкодження металу, поломок устаткування, що використовує охолоджений пар. Мала інтенсивність тепломасообмінних процесів у пароохолоджувачі і редуційно-охолоджувальній установці вимагає великих масогабаритних характеристик.

Ефективність редуційно-охолоджувальної установки, рівень її продуктивної дії лежить в основі ексергії.

Рівняння ексергетичного балансу для редуційно-охолоджувальної установки:

$$e_{n_1} + e_k = e_{n_2} + e_{\text{вум}} \quad (1)$$

де  $e_{n_1}$  – ексергія пари на вході у редуційно-охолоджувальну установку;

$e_{n_2}$  – ексергія пари на виході з редуційно-охолоджувальної установки;

$e_k$  – ексергія конденсату,

$e_{\text{вум}}$  – втрати ексергії на незворотності процесу дроселювання.

$$e_{\text{вум}} = \frac{h_{n_1} - h_0 - T_0(S_{n_1} - S_0) \cdot G_n + h_k - h_0 - T_0(S_k - S_0) \cdot G_k - (h_{n_2} - h_0 - T_0(S_{n_2} - S_0)) \cdot (G_n + G_k)}{G_n + G_k}$$

де  $S_{n_1}, S_{n_2}$  – ентропія пари до і після редуційно-охолоджувальної установки;

$h_{n_1}, h_{n_2}$  – ентальпія пари до і після редуційно-охолоджувальної установки;

$S_k, h_k$  – ентропія і ентальпія конденсату, який впорскується у редуційно-охолоджувальну установку.

Схема ексергетичних потоків редуційно-охолоджувальної установки наведена на рис. 2.

Рівняння теплового балансу редуційно-охолоджувальної установки виглядає наступним чином:

$$G_{zn} i_{zn} + G_e i_e = G_{pn} i_{pn} + (1 - \varphi) G_e i_{e\text{в}} \quad (3)$$

де  $G_{zn}$  – витрата гострої пари;

$i_{zn}$  – ентальпія гострої пари, що визначається за таблицями для водяної пари відповідно до його тиску  $P_{zn}$  і температури  $t_{zn}$ ;

$G_e$  – витрата охолоджуючої води, що впорскується;

$i_e$  – ентальпія охолоджуючої води, що впорскується визначається за формулою:

$$i_{e1} = c_e t_{e1} \quad (4)$$

де  $c_e$  – теплоємність води,

$t_{e1}$  – температура охолоджуючої води, що впорскується;

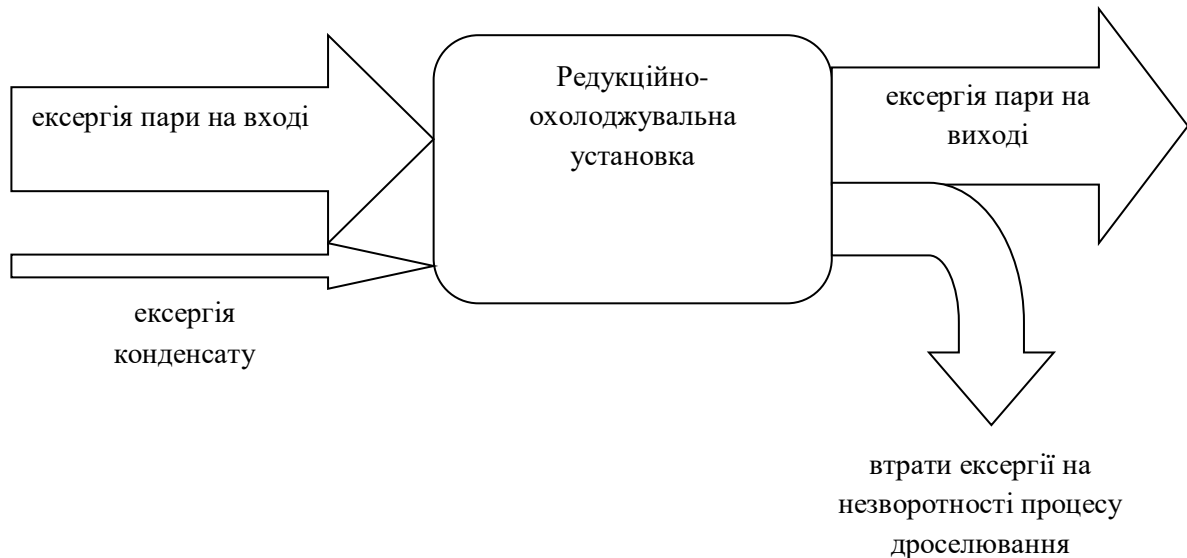
$G_{pn}$  – витрата редукованої пари на виході з редуційно-охолоджувальної установки;

$i_{pn}$  – ентальпія редукованої пари на виході з редуційно-охолоджувальної установки, визначається за таблицями для водяної пари для насиченої пари з тиском  $P_{pn}$ ;

$\varphi$  – коефіцієнт обліку кількості води, що охолоджує, яка випарувалася в редукційно-охолоджувальній установці,  $\varphi = 0,65 \div 0,7$ ;

$i_{ов}$  – ентальпія води, яка не випарувалася в охолоджувачі редукційно-охолоджувальної установки і відведеної з редукційно-охолоджувальної установки з температурою, що дорівнює температурі насичення при тиску скороченої пари  $P_{pn}$ :

$$i_{ов} = c_e t_{pn} \quad (5)$$



\* власна розробка автора на основі [10]

Рис. 2. Схема ексергетичних потоків редукційно-охолоджувальної установки

Рівняння матеріального балансу редукційно-охолоджувальної установки виглядає наступним чином:

$$G_{он} + G_e = G_{pn} + (1 - \varphi)G_e \quad (6)$$

або формула для визначення витрати гострої пари:

$$G_{он} = G_{pn} - \varphi G_e \quad (7)$$

Відповідно формула для обчислення витрати охолоджуючої води:

$$G_e = \frac{G_{pn}(i_{zn} - i_{pn})}{\varphi \cdot i_{zn} + (1 - \varphi) \cdot i_{pe} - i_{ов}}$$

Параметри, які використовуються при аналізі функціонування редукційно-охолоджувальної установки, це:

тиск  $P_{pn}$ , температура  $t_{pn}$  і витрата  $G_{pn}$  редукованої пари, що відпускається споживачеві;

тиск  $P_{zn}$ , температура  $t_{zn}$  і витрата  $G_{zn}$  гострої пари;

витрата  $G_e$  і температура  $t_e$  охолоджуючої води.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У роботі розкрито математичний аспект продуктивності дії редукційно-охолоджувальних установок. Головними параметрами, що використовуються при аналізі функціонування редукційно-охолоджувальної установки є: тиск, температура і витрата редукованої пари, що відпускається споживачеві; тиск, температура і витрата гострої пари; витрата і температура охолоджуючої води. В основі ефективності редукційно-

охолоджувальної установки та визначення рівня продуктивної дії редуційно-охолоджувальної установки лежить ексергія, яка розкриває паралель максимальної роботи об'єкту.

Перспективним напрямком подальших досліджень є удосконалення сучасної редуційно-охолоджувальної установки шляхом загальної автоматизації та встановлення новітніх компонентів для підвищення продуктивності та ефективності редуційно-охолоджувальної установки.

#### References.

1. Lukhtura, F.I., Pyzhikov, A.V., & Khlestova, O.A. (2018). On some ways to improve the thermal efficiency and reliability of industrial CHP. *Bulletin of the Priazovsky State Technical University. Series: Technical Sciences*, (36), 88-100.
2. Malyarenko, V.A., Shubenko, O.L., Andreev, S. Yu., Babak, M. Yu., & Senetsky, O.V. (2018). Cogeneration technologies in small energy: a monograph. Kharkiv: KhNUMG them. O.M. Beketova
3. Vysokikh L.V., Klimenko V.V. and Kravchenko V.I. Improving the efficiency of power supply systems through the use of cogeneration units with a turbine unit. (2019). Promising areas of information and computer systems and networks, computer-integrated technologies in industry, telecommunications, energy and transport: All-Ukrainian scientific-practical Internet conference. : Kropyvnytskyi. URL: <http://www.kntu.kr.ua/doc/zbirnyki/2019/11.pdf> (Last accessed: 17.03.2020).
4. Klimenko, V.V., Kravchenko, V.I., & Telyuta, R.V. (2020). Energy saving in heat technology processes and installations. Kropyvnytskyi: PE Exclusive-Systems.
5. Solovey, D.N., & Podzharov, A.V. (2016). The use of adventure turbines to improve the thermal efficiency and reliability of industrial heating power plants. *Actual problems of energy: materials of the 72nd scientific and technical conference of students and postgraduates*, 412-415.
6. Maurer, T. (2016). *Kältetechnik für Ingenieure*. VDE Verlag GmbH. 575 p.
7. Li, S. X., & Wang, J. S. (2015). Dynamic modeling of steam condenser and design of PI controller based on grey wolf optimizer. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-9, doi:10.1155/2015/120975.
8. Emadi, A. (Ed.). (2015). *Advanced electric drive vehicles*. Boca Raton, FL: CRC Press. 586 p.
9. Takashi, M., Shuichi, H., Daisuke, O., Masahiko, T., & Jun, S. (2013). Improvement of thermal environment and reduction of energy consumption for cooling and heating by retrofitting windows. *Frontiers of Architectural Research*, 2(1), 1-10.
10. El Mankibi, M., Cantin, R., & Zoubir, A. (2015). Contribution to the thermal renovation of old buildings: numerical and experimental approach for characterizing a double window. *Energy Procedia*, 78, 2470-2475.
11. Gloriant, F., Tittlein, P., Joulin, A., & Lassue, S. (2015). Study of the performances of a supply-air window for air renewal pre-heating. *Energy Procedia*, 78, 525-530.