

УДК 621.311.21.001.2

А.В.Мороз (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## Метод аналітичного визначення гідроенергетичного потенціалу створу малої річки на основі лінеаризації імовірнісного розподілу витрат води

*Розроблено метод розрахунку потужності та річного обсягу енергії водного потоку створу малої річки з використанням аналітичного виразу функції забезпеченості стоку.*

**Ключові слова:** гідроенергетика, гідрологія, енергія, імовірність, потужність.

*Разработан метод расчета мощности и годового объёма энергии водного потока створа малой реки с использованием аналитического выражения функции обеспеченности стока.*

**Ключевые слова:** гидроэнергетика, гидрология, энергия, вероятность, мощность.

**Вступ.** Мала гідроенергетика – одна з надійних технологій виробництва електроенергії, яка характеризується досить гарантованим відновлюваним енергоресурсом, відповідає комплексу екологічних вимог зі збереження біологічних, геоморфологічних та гідрохімічних процесів у руслі і долині річки. Крім того, мала гідроенергетика сприяє та надає можливості вирішення інших важливих господарських задач, таких як водопостачання, ведення рибного господарства, керованого захисту прилеглих територій від повеней, переводу цих земель з категорії негарантованого землеробства в гарантоване, зокрема, завдяки зрошенню.

Бурхливий розвиток малої гідроенергетики розпочався ще на початку ХХ століття. Відомо, що на початок 1960-х років в Україні налічувалось близько 956 малих ГЕС загальною потужністю 30 тис. кВт. Але надалі, зі створенням потужних об'єктів атомної і теплової енергетики, мала гідроенергетика стала занепадати. До кінця 1980-х збереглося всього 49 станцій, і до 1995 року розвитком цієї галузі ніхто не займався. Історичні аспекти розвитку малої гідроенергетики України були розглянуті у роботі [1].

На сьогодні, станом на 2014 рік, на території України в експлуатації знаходяться 98 малих ГЕС сумарною потужністю близько 79 МВт. Середньорічний обсяг виробництва електроенергії малими ГЕС складає біля 210 тис. МВт-год/рік [2].

Потенційні можливості малої гідроенергетики

України на період до 2030 року оцінені в Енергетичній стратегії (2006 р.) на рівні 1140 МВт потужності з річним обсягом виробництва електроенергії 3,34 млрд кВт-год/рік. У проєкті нової редакції Енергетичної стратегії (червень, 2012 р.) потенціал оцінений на рівні 0,4-0,8 ТВт-год. Вчинній редакції Енергетичної стратегії (схвалена КМ України 24 липня 2013 р. №1071-р) зазначено, що економічно доцільний потенціал малих ГЕС в Україні становить до 4 ГВт. Спеціалізовані організації з відновлення малих ГЕС прогнозують наявність потенціалу малої гідроенергетики в обсязі 8,2 млрд кВт-год/рік. Значна розбіжність у кількісних показниках величини гідроенергетичних ресурсів обумовлена проведенням лише експертної оцінки без виконання наукових досліджень. Доцільно зазначити, що після 1960 року повномасштабне уточнення гідроенергетичного потенціалу малих річок на території сучасної України не проводилось. Аналіз розрахункових досліджень та їх вихідних положень протягом усієї історії досліджень наведено у роботі [3].

За останні 50 років суттєво змінилась нормативно-правова база та природоохоронні аспекти розвитку малої гідроенергетики. З 2012 року була змінена величина встановленої максимальної потужності малої ГЕС, яка складає 10 МВт (раніше було 30 МВт), створені механізми стимулювання виробництва електроенергії малими ГЕС, які підвищили інтерес до будівництва та відновлення станцій [4, 5]. Інші положення чинної нормативно-

правової бази стосовно малої гідроенергетики докладно викладені у роботах [2, 4–6]. Тому подальший розвиток малої гідроенергетики потребує сучасного дослідження її потенціалу згідно чинної нормативно-правової бази та природоохоронних обмежень.

**Постановка задачі.** Режими експлуатації станцій повинні забезпечити мінімальний термін повернення коштів, затрачених на їх будівництво або відновлення. Вибір номінальної потужності станції, кількості агрегатів та розробка оптимальних режимів експлуатації потребують знання потенціалу створу малої річки з урахуванням екологічних обмежень, коли не всю воду можна використовувати для гідроенергетичних потреб. Кількісна оцінка вищезазначених факторів може бути зроблена шляхом використання імовірнісного підходу до визначення витрат води річкового стоку протягом року.

Основні теоретичні положення визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок за різних значень забезпеченості водного стоку викладено у роботі [7]. Проте вони розроблені за умови використання повної енергії водотоку і не враховують екологічні обмеження на величину стоку. Це може бути зроблено з використанням імовірнісного трипараметричного гамма-розподілу у формі Крицького-Менкеля, який знайшов широке розповсюдження у вітчизняній гідроенергетиці. Застосування, властивості та особливості даного розподілу для визначення гідроенергетичного потенціалу малих річок були розглянуті у роботах [8–10].

**Визначення гідроенергетичного потенціалу створу на основі лінеаризації імовірнісного розподілу витрат води.** Можливість застосування лінеаризації імовірнісного розподілу у формі Крицького-Менкеля була обґрунтована в [11]. Обумовлюється це тим, що малі ГЕС не експлуатуються під час таких природних явищ як повінь, паводки, літня та зимова межень і на період оперативних заходів з регулювання водного потоку згідно законодавчої бази. Це займає близько 2 місяців протягом року та відповідає забезпеченості річного стоку у межах 0-10% та 90-100%. Визначення гідроенергетичного потенціалу створу в робочому діапазоні зміни забезпеченості стоку

від 10 до 90% може бути реалізовано з використанням лінеаризації імовірнісного розподілу витрат води за гідрологічними параметрами.

В подальшому викладенні розподіл буде представлятися за допомогою модульного коефіцієнта  $k_{p_Q}$ , фізичний зміст якого визначається рівнянням:

$$Q = Q_{cp} \cdot k_{p_Q}, \quad (1)$$

де  $Q$  – витрата води стоку;  $Q_{cp}$  – середня багаторічна витрата води створу.

Лінеаризована функція розподілу з урахуванням обмежень на використання стоку води має вигляд [11]:

$$p = \frac{p_2 - p_1}{k_{p_2} - k_{p_1}} k_{p_Q} + \frac{p_1 \cdot k_{p_2} - p_2 \cdot k_{p_1}}{k_{p_2} - k_{p_1}}, \quad (2)$$

$$\text{за } p_1 = 90\%, \quad p_2 = 10\%,$$

де  $p$  – розрахункова забезпеченість водного потоку;  $p_1, p_2$  – значення забезпеченості стоку, через які проводиться лінійна функція;  $k_{p_1}, k_{p_2}$  – значення модульних коефіцієнтів при забезпеченості  $p_1$  та  $p_2$  відповідно.

Використання гідроенергетичного потенціалу створу може бути реалізоване шляхом будівництва ГЕС із різною кількістю агрегатів. Зазвичай до складу малої станції входить 1, 2 або 3 агрегати однакової потужності. Значення номінальної потужності станції відповідає вибраному рівню забезпеченості витрат стоку  $p_Q$  та відповідній величині  $k_{p_Q}$  [7]:

$$N_p = 9,81 \cdot \eta \cdot Q_{cp} \cdot k_{p_Q} \cdot H, \quad (3)$$

де  $H$  – напір ГЕС, м;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії, який враховує втрати на перетворення енергії на малих ГЕС;  $Q_{cp}$  – (м<sup>3</sup>/с).

За приклад, розглянемо формули розрахунку потужності та енергії водного потоку для станції у складі 3-х однакових агрегатів. Передбачається, що значення  $\eta, H, T, Q_{cp}, k_{p_1}, k_{p_2}$  відомі, а  $k_{p_Q}$  відповідає прийнятому значенню розрахункової забезпеченості  $p_Q$ . Значення  $p_1, p_2$  дорівнюють 90% та 10% відповідно.

Станція може працювати у різних режимах:

• при малому обсязі води  $Q_1$  із забезпеченістю  $p_{1Q}$  на станції працює лише 1 агрегат:

$$Q_1 = \frac{1}{3} Q_{cp} \cdot k_{pQ}, \quad (4)$$

$$p_{1Q} = \frac{p_2 - p_1}{k_{p2} - k_{p1}} k_{pQ} \cdot \frac{1}{3} + \frac{p_1 \cdot k_{p2} - p_2 \cdot k_{p1}}{k_{p2} - k_{p1}} = \frac{-80}{k_{p2} - k_{p1}} k_{pQ} \cdot \frac{1}{3} + \frac{90 \cdot k_{p2} - 10 \cdot k_{p1}}{k_{p2} - k_{p1}}, \quad (5)$$

• при збільшенні обсягу води до  $Q_2$  із забезпеченістю стоку  $p_{2Q}$  вмикається другий агрегат:

$$Q_2 = \frac{2}{3} Q_{cp} \cdot k_{pQ}, \quad (6)$$

$$p_{2Q} = \frac{-80}{k_{p2} - k_{p1}} k_{pQ} \cdot \frac{2}{3} + \frac{90 \cdot k_{p2} - 10 \cdot k_{p1}}{k_{p2} - k_{p1}}, \quad (7)$$

• під час великої води з витратою  $Q_3$  та забезпеченістю стоку  $p_{3Q}$  вмикається 3-й агрегат:

$$Q_3 = Q_{cp} \cdot k_{pQ}, \quad (8)$$

$$p_{3Q} = \frac{-80}{k_{p2} - k_{p1}} k_{pQ} + \frac{90 \cdot k_{p2} - 10 \cdot k_{p1}}{k_{p2} - k_{p1}}. \quad (9)$$

Оскільки тривалість роботи окремого агрегату станції не може мати від'ємного значення, то введемо умову:

$$10\% \leq p_{1Q}, p_{2Q}, p_{3Q} \leq 90\%. \quad (10)$$

Якщо умова (10) не виконується, то розрахункова забезпеченість дорівнює значенню найближчої межі. Наприклад, якщо  $p_{1Q} = 98\%$ , то для розрахунку використовується  $p_{1Q} = 90\%$ .

Сумарну забезпеченість роботи всіх трьох агрегатів однакової потужності  $p_{3a}$  можна виразити наступним чином:

$$p_{3a} = (p_{1Q} - p_2) + (p_{2Q} - p_2) + (p_{3Q} - p_2) = (p_{1Q} - 10) + (p_{2Q} - 10) + (p_{3Q} - 10). \quad (11)$$

Обсяг виробленої енергії  $E$  малою ГЕС у складі 3-х однакових агрегатів за річний проміжок часу  $T$  буде дорівнювати:

$$E = \frac{N_p \cdot T \cdot p_{3a}}{3 \cdot 10^5} = \frac{9,81 \cdot \eta \cdot Q_{cp} \cdot k_{pQ} \cdot H \cdot T}{3 \cdot 10^5} \times (p_{1Q} + p_{2Q} + p_{3Q} - 30). \quad (12)$$

На основі викладеного розрахунку запишемо узагальнену формулу для розрахунку енергії станції з різною кількістю агрегатів однакової потужності:

$$E = \frac{N_p \cdot T}{n \cdot 10^5} (p_Q + p_{\frac{n-1}{n}Q} + p_{\frac{n-2}{n}Q} - n \cdot p_2), \quad (13)$$

$$10\% \leq p_Q, p_{\frac{n-1}{n}Q}, p_{\frac{n-2}{n}Q} \leq 90\%, \quad (14)$$

$$\frac{n-1}{n}, \frac{n-2}{n} > 0, \quad (15)$$

де  $n$  – кількість встановлених агрегатів на станції;  $p_Q, p_{\frac{n-1}{n}Q}, p_{\frac{n-2}{n}Q}$  – значення забезпеченості кожного режиму експлуатації.

Також являє інтерес випадок застосування декількох агрегатів з різною потужністю, що в певній мірі відповідає досвіду спорудження малих ГЕС. Зазвичай потужність меншого агрегату приймається рівною половинні потужності основного. В подальшому викладенні приймаємо, що кількість основних агрегатів знову складає 1, 2 або 3 одиниці. Тоді потужність та енергія малої ГЕС визначаються за наступними формулами:

$$N_p = 9,81 \cdot \eta \cdot Q_{cp} \cdot k_{pQ} \cdot H \cdot \left( \frac{2n+1}{2n} \right), \quad (16)$$

$$E = \frac{9,81 \cdot \eta \cdot H \cdot Q_{cp} \cdot k_{pQ} \cdot T}{2n \cdot 10^5} \times \left[ \left( p_Q - (2 \cdot n + 1) \cdot p_2 + p_{\frac{n-1}{n}Q} + p_{\frac{n-2}{n}Q} \right) + \left( p_{\frac{2n+1}{2n}Q} + p_{\frac{2n-1}{2n}Q} + p_{\frac{2n-3}{2n}Q} + p_{\frac{2n-5}{2n}Q} \right) \right], \quad (17)$$

$$\text{за } \frac{2n+1}{2n}, \frac{2n-1}{2n}, \frac{2n-3}{2n}, \frac{2n-5}{2n}, \frac{n-1}{n}, \frac{n-2}{n} > 0, \quad (18)$$

$$10\% \leq P_{\frac{2n+1}{2n}Q}, P_{\frac{2n-1}{2n}Q}, P_{\frac{2n-3}{2n}Q} \leq 90\%,$$

$$10\% \leq P_{\frac{2n-5}{2n}Q}, P_Q, P_{\frac{n-1}{n}Q}, P_{\frac{n-2}{n}Q} \leq 90\%. \quad (19)$$

**Розрахункові дослідження гідроенергетичного потенціалу створу малої річки за різних рівнів забезпеченості витрат води.** Розрахунки виконаємо для трьох рівнів забезпеченості витрат води (25, 50 та 75%), діапазон зміни значень яких охоплює можливі режими водовикористання стоку для виробництва електроенергії малими ГЕС. Кожному значенню забезпеченості відповідає певна величина  $k_{pQ}$  і величина номінальної

потужності ГЕС.

За приклад, використаємо гідрологічні характеристики річки Стрий згідно даних результатів вимірювання на гідропості біля с. Новий Кропивник [12], а розрахунки виконаємо для значення напору 1 м:

$$Q_{cp} = 19,2; C_v = 0,39; C_s/C_v = 0,77; H = 1.$$

На рис. 1 наведено графічне зображення залежності модульного коефіцієнта  $k_{pQ}$  від розрахункової забезпеченості  $p$ , визначене згідно [11], та позначені розрахункові рівні забезпеченості 25, 50 та 75%. Отримані результати представлені у табл. 1, де додатковий агрегат позначений як д.а.

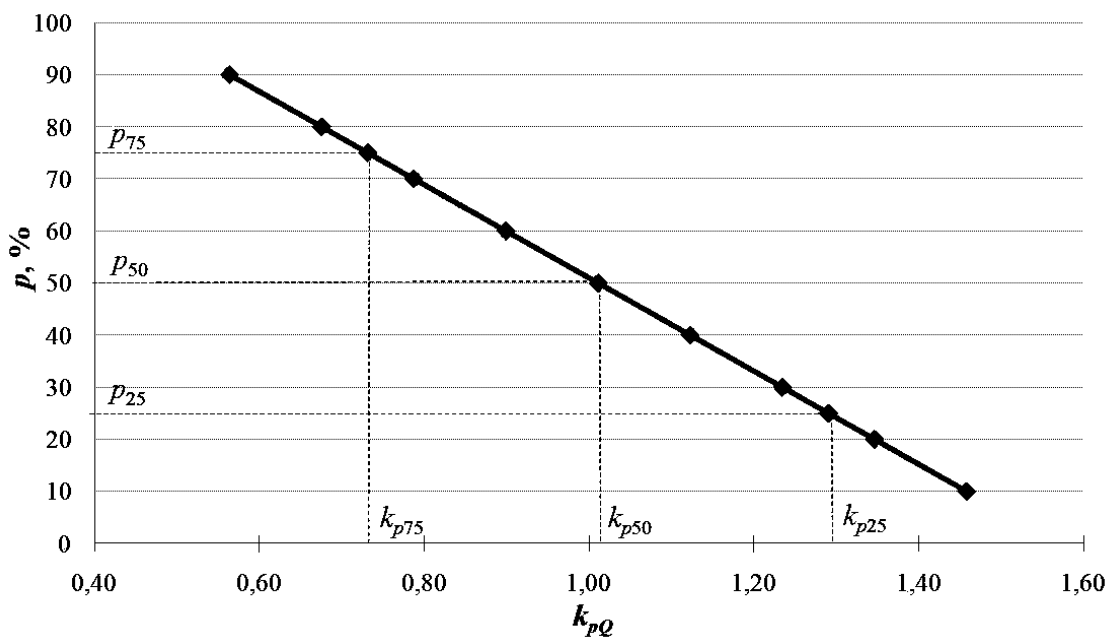


Рис. 1. Залежність забезпеченості  $p$  від модульного коефіцієнта  $k_{pQ}$

Таблиця 1. Гідроенергетичний потенціал створу річки

Кількість агрегатів	Потужність малої ГЕС $N_p$ , кВт			Виробництво електроенергії $E$ , МВт·год		
	Забезпеченість стоку, %					
	25	50	75	25	50	75
1	178,585	139,912	101,239	234,660	490,251	576,454
1 та д.а.	267,877	209,868	151,858	686,168	735,376	786,093
2	178,585	139,912	101,239	686,168	735,376	642,968
2 та д.а.	223,231	174,890	126,549	827,506	857,939	784,063
3	178,585	139,912	101,239	774,284	776,837	665,139
3 та д.а.	208,349	163,230	118,112	874,619	878,669	761,215

Порівняльний аналіз обсягів виробництва електроенергії станцією з різною кількістю агрегатів виконаємо у відносних одиницях. За базові величини потужності та енергії візьмемо відповідні значення для варіанту з одним встановленим агрегатом за забезпеченості  $p = 50\%$  ( $k_{p0} = 1$ ). Результати для порівняння наведені на рис. 2. Вони засвідчують, що станція з одним агрегатом найменш ефективна за різної забезпеченості використання стоку річки. Застосування додаткового агрегату половинної потужності суттєво збільшує обсяг виробництва станцій з одним та двома основними агрегатами. Проте необхідно зазначити, що в разі застосування додаткового агрегату половинної потужності збільшується і величина встановленої потужності, відповідно

збільшується і обсяг інвестицій на спорудження станції. Порівняння енергетичної ефективності встановленого 1 кВт потужності обладнання за використання водного потоку із забезпеченістю 50% показано на рис. 3. Найбільша віддача встановленого обладнання характерна для варіантів побудови станції з двома та більше агрегатами однакової потужності. Прямої залежності між зміною значення забезпеченості та обсягом виробництва енергії також не прослідковується (рис. 2). Мала ГЕС із одним основним агрегатом виробить більше енергії при малій воді, яка відповідає забезпеченості 75%. Станція з двома основними агрегатами виробить більше енергії при забезпеченості стоку 50%, а мала ГЕС із трьома агрегатами виробить однакову кількість при забезпеченості 25 та 50%.

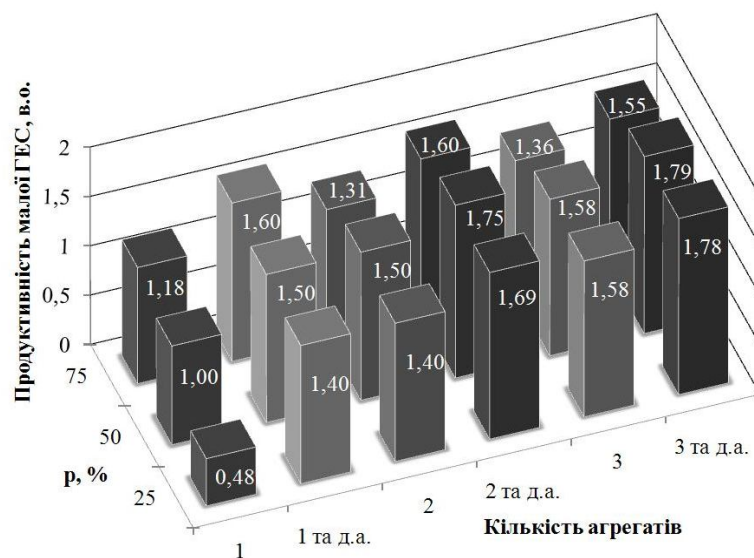


Рис. 2. Продуктивність малої ГЕС в залежності від кількості агрегатів у складі станції.

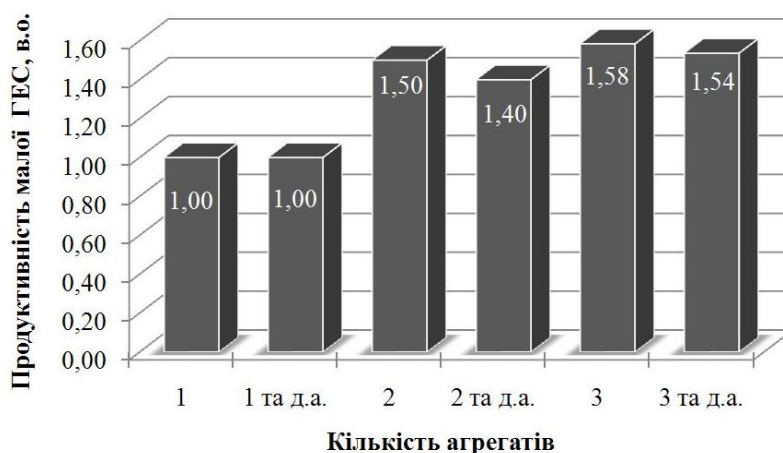


Рис. 3. Питома продуктивність малої ГЕС в залежності від кількості агрегатів у складі станції (на 1 кВт встановленої потужності).

Отримані результати (табл. 1) засвідчують також, що зміна обсягів виробництва електроенергії станції не пропорційна відповідній зміні встановленої потужності для всіх значень забезпеченості стоку річки.

Отримані кількісні показники можуть змінитися для інших створів, оскільки залежать від гідрологічних характеристик стоку та прийнятих обмежень. Проте зрозуміло, що в якості показника гідроенергетичного потенціалу доцільно застосовувати лише обсяг виробництва електроенергії малою ГЕС для певного створу, а не величину потужності, що і зазначено у проекті державного стандарту "Гідроенергетика. Гідроелектростанції малі. Терміни та визначення понять" [6].

**Висновки.** 1. Розроблено метод аналітичного визначення гідроенергетичного потенціалу малої річки на основі лінеаризації імовірнісного розподілу стоку води, який дозволяє розрахувати потужність та енергію водного потоку з урахуванням обмежень на використання стоку річки в межень та повінь.

2. В якості показника гідроенергетичного потенціалу малої річки доцільно застосовувати можливий обсяг виробництва електроенергії. Величина встановленої потужності може застосовуватись лише як додатковий довідковий показник.

1. *Мороз А.В.* Етапи становлення та сучасний стан малої гідроенергетики України // Відновлювана енергетика. – 2013. – №4. – С. 59–63.

2. *Васько П.Ф., Мороз А.В.* Стан та потенціал малої гідроенергетики України // Відновлювана енергетика. – 2014. – №3. – С. 81–86.

3. *Мороз А.В.* Аналіз розрахункових досліджень

гідроенергетичних ресурсів малих річок України // Відновлювана енергетика. – 2014. – №1. – С. 70–75.

4. *Мороз А.В.* Природоохоронні аспекти розвитку малої гідроенергетики в Карпатському регіоні // Відновлювана енергетика. – 2012. – №4. – С. 63–69.

5. *Васько П.Ф., Мороз А.В.* Законодательные стимулы и природоохранные ограничения использования гидроэнергетических ресурсов малых рек Украины // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №17. – С. 82–92.

6. *Васько П.Ф., Бриль А.О., Мороз А.В.* Проект державного стандарту "Гідроенергетика. Гідроелектростанції малі. Терміни та визначення понять" // Відновлювана енергетика. – 2013. – №2. – С. 65–67.

7. *Васько П.Ф., Бриль А.О., Мороз А.В., Озорин Д.Ф.* Расчёт теоретического значения гидроэнергетического потенциала малых рек с учётом обеспеченности стока воды // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №7. – С. 126–132.

8. *Васько П.Ф., Озорин Д.Ф.* Визначення імовірнісних гідрологічних характеристик річок західного регіону України за трипараметричним гама-розподілом у формі Крицького-Менкеля // Відновлювана енергетика. – 2010. – №4. – С. 54–59.

9. *Озорин Д.Ф.* Застосування трипараметричного гама-розподілу у формі Крицького-Менкеля для розрахунку імовірнісних гідрологічних характеристик повені на річках західного регіону України // Відновлювана енергетика. – 2011. – №2. – С. 62–65.

10. *Озорин Д.Ф.* Применение трипараметрического гамма-распределения в форме Крицького-Менкеля для определения вероятностных гидрологических характеристик малых рек // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №7. – С. 113–118.

11. *Мороз А.В.* Властивості та особливості застосування імовірнісного трипараметричного гама-розподілу для визначення технічного гідроенергетичного потенціалу малої річки // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С. 72–78.

12. *Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б.И. Стрельца.* – К.: Урожай, 1987. – 304 с.