

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА СФЕРИЧНУ ПОВЕРХНЮ В УМОВАХ ВІДНОСНОЇ РІВНОВАГИ РІДИНИ МЕТОДОМ K123

Юрій Копаниця

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037
канд. техн. наук, доцент, kopanytsia.iud@knuba.edu.ua,
orcid.org/0000-0002-9470-1902

DOI: 10.32347/2524-0021.2020.34.12-18

Анотація. Відсутність сучасних універсальних комп'ютерних алгоритмів аналітичного та чисельного моделювання та розрахунку сили гідростатичного тиску є проблемою при проектуванні окремих елементів водно-шламової системи збагачувальної фабрики. Визначення параметрів вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску - величини, напряму й розрахунок координат центру тиску у тривимірному просторі - дозволяє проектувати надійні елементи вивантаження продукту у процесах освітлення, згущення та сепарації в системах, які використовують відцентрове прискорення в умовах відносної рівноваги рідини. Запропоновано авторський універсальний алгоритм - метод трьох команд K123 - розрахунку параметрів вектору сили гідростатичного тиску на криволінійну поверхню в умовах відносної рівноваги рідини. На прикладі тиску на сферичну поверхню, яка обертається із певною частотою, представлено розрахунок сили тиску на довільний елемент поверхні. Представлені алгоритми дозволяють підвищити ефективність проектування елементів автоматичного керування вивантаження освітленого або згущеного продукту у водно-шламових системах збагачувальної фабрики.

Ключові слова: метод трьох команд; K123; гідростатичний тиск; відносна рівновага рідини; координати центру тиску

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку комп'ютерів та персональних мобільних гаджетів можна охарактеризувати піковою продуктивністю машини, яка вимірюється у кількості операцій в секунду. Одиниця виміру продуктивності називається флопс. *Snapdragon 865* – новий мікропроцесор смартфона – має пікову продуктивність 946 Гфлопс. Для порівняння – *Cray-1* – легендарний суперкомп'ютер, спроєктований Сеймуром Креєм і створений компанією *Cray Research Inc.* в 1976 році мав пікову продуктивність машини – 133 Мфлопс. Це означає, що сучасний науковець, інженер, студент має доступ до персонального мікрокомп'ютерного пристрою – наприклад смартфона – який у 7112 рази потужніший за суперкомп'ютер ХХ-го століття. Ядерний проєкт Радянського Союзу

було розраховано у спеціальному розрахунковому бюро на логарифмічних лінійках. Для забезпечення точності розрахунків академік Ігор Васильович Курчатov звернувся до Лаврентія Півловича Бєрія із пропозицією виготовити спеціальні логарифмічні лінійки. Лінійки було виготовлено із металу. Вони мали довжину 500 мм й дозволяли проводити розрахунки підвищеної точності. Для забезпечення точності розрахунків у підрозділі працювали виключно жінки – гарантія точності виконання однотипних операцій. Два наведені приклади із суперкомп'ютером та логарифмічною лінійкою розділяють 30-ть років – час життя одного покоління. Відповідно ядерний проєкт розраховано із похибкою у межах трьох порядків – $10^{(-3)}$. Космічна програма підняла вимоги до точності розрахунків ще на три порядки –

10[^](-6) – зародилась комп'ютерна індустрія 60-х років. Але все це було здійснено на базі розвитку нових алгоритмів, структур даних і методах розрахунку, які у свою чергу сприяли подальшому розвитку самої математичної науки.

МЕТА І МЕТОДИ

Саме бажання вирішувати задачі сучасності на відповідному технологічному рівні примушує надати критичний аналіз існуючим, загальноприйнятим, академічним, знайомим, таким простим та зручним й нажаль, як показує практика, безнадійно застарілим підходам до розрахунків у вітчизняних підручниках. Підручниках, які останні сто років включають стандартні незмінні задачі. З початку ХХ-го століття у підручниках та задачах алгоритми розрахунку та формули визначення гідростатичного тиску залишаються незмінними. Обмежені можливості стандартних формул звужують коло стандартних прикладів та задач, які використовуються у навчальному процесі [1,2]. Якість, складність та різноманітність задач у підручниках першої половини ХХ-го століття значно вище у порівнянні із сучасним набором задач [3]. Для прикладу, розвиток науки кібернетики й комп'ютерів у 60-х роках сприяв відродженню й бурхливому розвитку багатьох напрямів як у прикладній математиці у розділах чисельних методів, так й розвиток нового математичного апарату аналітичних розрахунків. Нажаль потужній розвиток комп'ютерної науки та багатьох розділів математичної науки обійшло стороною стандартний класичний математичний апарат розрахунків який існує в сучасних вітчизняних підручниках у розділі гідростатика.

Які виклики стоять перед сучасним навчальним процесом та підготовкою майбутніх інженерних кадрів у ХХІ-му сторіччі? По-перше, важлива задача забезпечити впровадження сучасних інженерних розрахунків у навчальний процес [4-7]. Сучасна підготовка, на прикладі іноземних підручників, базується на розрахунках у середовищі систем комп'ютерної математики (*Maple, Mathematica, MathLab, MathCAD, MAXIMA* тощо) [8-21].

Комп'ютерний розрахунок передбачає декілька варіантів алгоритмів й розрахунків

однієї задачі [22-25]. Або розрахунок тестового прикладу із відомим аналітичним точним результатом. Останнє потрібно для перевірки коректної роботи комп'ютерного коду програми [6]. Комп'ютер нам не допомагає швидко розрахувати, але дозволяє отримати дуже швидко й дуже багато помилок. Комп'ютерні розрахунки включають додатково імовірність появи помилок у коді самої розрахункової програми, особливості реалізації комп'ютерної математики у мікрокодї процесору (втрата значущих розрядів) впливають на результат, нові та не виправлені власні помилки у системі комп'ютерної математики. Всі ці особливості комп'ютерного розрахунку вимагають розробляти багатоваріантні алгоритми розрахунку задачі. Наприклад, розробляти паралельно аналітичні й чисельні методи розрахунку для кожної задачі, або розраховувати певний клас прикладів тестових задач для перевірки коду програми. Іншими словами – сучасний інженер повинен мати практичні навички використання базових елементів програмування (цикл, умовний блок, вектор) й навчитись тестувати роботу програми. Ніхто не призиває всіх бути програмістами. Але базовими навичками та основами повинен володіти кожний сучасний інженер. На думку автора дуже корисно включати задачі без готової відповіді, але із методичними рекомендаціями щодо розмірності величин й аналізом порядку ймовірних значень.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Прикладні аспекти аналітичного та чисельного розрахунку авторським універсальним комп'ютерним методом трьох команд – далі, Методом K123 – представлено на прикладі визначення сили гідростатичного тиску на елемент сферичної поверхні в умовах відносної рівноваги рідини (рис. 1). У задачі розглянуто визначення всіх параметрів вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску на елемент криволінійної поверхні. У якості прикладу обрано сферичну поверхню із вертикальним отвором постійної нескінченно малої ширини у боковій поверхні, який прикрито кришкою. Під впливом певної кутової частоти обертання вільна поверхня рідини має вісесиметричну параболоїдальну твірну.

Горизонтальна проекція вектору

$$P_x = \int_{r_1}^{r_2} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w dr \quad (K1)$$

$$mP_x = \int_{r_1}^{r_2} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w r dr \quad (K2)$$

$$r_x = \frac{mP_x}{P_x} \quad (K3)$$

Чисельний алгоритм

$$P_x = \sum_{i=1}^{1000} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w r_i \quad (K1')$$

$$mP_x = \sum_{i=1}^{1000} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w r r_i \quad (K2')$$

$$r_x = \frac{mP_x}{P_x} \quad (K3')$$

Чисельний алгоритм Метода К123 визначення вертикальної проекції вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску на елемент сферичної поверхні

$$P_z = \sum_{i=1}^{1000} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w (r_{i+1} - r_i) / (\sqrt{R^2 - r_i^2} - \sqrt{R^2 - r_{i+1}^2}) r_i \quad (K1'')$$

$$mP_z = \sum_{i=1}^{1000} \rho g \left(h_b + \sqrt{R^2 - r_i^2} + \frac{\Omega^2 r_i^2}{2g} \right) \Delta w (r_{i+1} - r_i) / (\sqrt{R^2 - r_i^2} - \sqrt{R^2 - r_{i+1}^2}) r_i (R - \sqrt{R^2 - r_i^2}) \quad (K2'')$$

$$z_r = \frac{mP_z}{P_z} \quad (K3'')$$

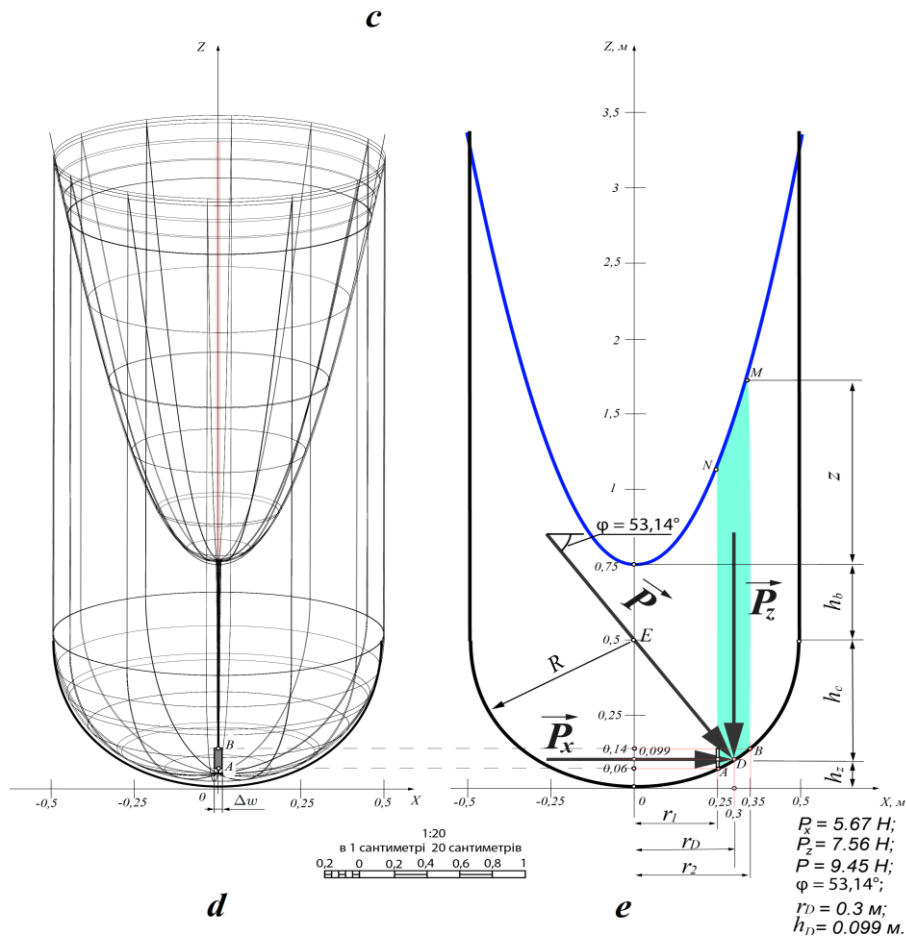


Рис.1. Метод трьох команд К123. Сила гідростатичного тиску на елемент сферичної поверхні **a** – аналітичні формули горизонтальної проекції вектору; **b** – чисельний розрахунок горизонтальної проекції вектору; **c** – чисельний розрахунок вертикальної проекції вектору; **d** – форма вільної поверхні рідини в умовах відносної рівноваги на горизонтальний елемент поверхні AB (фронтальна проекція); **e** – вектор рівнодійної сили гідростатичного тиску (бокова проекція)

Fig.1. The method of three commands K123. The force of hydrostatic pressure on an element of a spherical surface **a** – analytical formulas of horizontal projection of the vector; **b** – numerical calculation of the horizontal projection of the vector; **c** – numerical calculation of the vertical projection of the vector; **d** – the shape of the free surface of the liquid in terms of relative equilibrium on the horizontal surface element AB (frontal projection); **e** – the vector of the equivalent force of hydrostatic pressure (lateral projection)

Спрощену форму криволінійної поверхні, на яку діє гідростатичний тиск, обрано із метою наочної демонстрації базових можливостей розрахунку Методом K123. Прийняти вихідні умови поставленої задачі вимагають визначення параметрів вектору сили у двох ортогональних напрямках – по радіусу вісь "x" та відносно вертикальної осі "z", тобто розглядається відцентровий напрям дії сили тиску. Іншими словами – третій ортогональний напрям – вісь "y" – однозначно зафіксовано.

Ускладнення форми розглянутої поверхні, наприклад асиметричність, не впливає на алгоритм розрахунку Методом K123. У вищезначених варіантах ми додатково у стандартній формі трьома командами (K1`, K2`, K3`) із використанням відповідного рівняння твірної визначаємо величину проекції сили тиску на вісь "y", або будь-який аналізований заданий напрям дії вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску. Методом трьох команд K123 за формулами K1, K2, K3 (рис.1.а) представлено аналітичне визначення горизонтальної проекції вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску. Момент сили визначається відносно початку координат. Відповідно чисельна реалізація Методу K123 представлена формулами K1', K2', K3' (рис.1.б) й проведено тестовий розрахунок. Оцінка точності отриманого чисельного результату за даними формулами проведена для 100 й 1000 ітерацій. Відповідне наближення до точного результату для означеної кількості ітерацій дорівнює 1% та 0,01%. Формули для вертикальної проекції вектору мають ту саму природу, іншими словами – однаковий набір елементарних операцій із числами однакового порядку. На основі отриманої оцінки точності результату у подальших розрахунках прийнято 1000 ітерацій. Формулами K1", K2", K3" (рис.1.в) Методу K123 представлено алгоритм чисельного розрахунку вертикальної проекції сили гідростатичного тиску.

На рис. 1.г пряма проекція рідини у стані відносної рівноваги для частоти обертання $n = 100$ об./хв. Графічне відображення результатів розрахунку та вихідні данні представлено на рисунку 1.д (бокова проекція). Методом K123 проведено чисельний експеримент – моделювання зміни частоти обертання рідини за умови, що нижня точка вільної поверхні рідини параболоїдальної фо-

рми не перетинає сферичне дно. Розрахунки проведено для частоти обертання у діапазоні $100 < n < 200$ об./хв. Відповідні значення відцентрового прискорення у діапазоні $0,5 g \dots 2,2 g$. Напрямок дії вектору сили проходить через центр сферичної поверхні. Розрахунки тестового прикладу проведено у системі комп'ютерної математики CAS MAXIMA. На рис. 1.г представлено форму вільної поверхні рідини за графіком параболи, яку згенеровано у пакеті CAS MAXIMA для вихідних даних із урахуванням кількості обертів $n = 100$ об./хв. На рисунку 1.д наведено графічну ілюстрацію результатів розрахунку із дотриманням масштабу з точністю лінійних розмірів – 0,01 мм, кутових значень – 0,01 град., вектор сили та його проекції представлено у відносному масштабі.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Апарати класифікації, освітлення, згущення, сепарації діють в складних умовах агресивної й руйнівної дії багатофазної рідини. Відомо п'ять основних напрямів інженерних рішень щодо забезпечення захисту внутрішньої поверхні самих апаратів: наплавлення або напилення зносостійкого покриття, наклеювання керамічних захисних елементів, напайка твердосплавних сталевих елементів, наклеювання високотвердих захисних елементів із загартованого лиття, наклеювання елементів з полімерного матеріалу. Сепарація (класифікація) пульпи у системах, які побудовано на використанні відцентрового прискорення (гідроциклони, центрифуги) відбувається через радіальні вузькі щілини, які регулюють шляхом перекивання. Зашламовка отворів призводить до аварійної зупинки апаратів, погіршення якості вихідного продукту. У водно-шламових системі збагачувальної фабрики із неперервним технологічним циклом важливо забезпечити надійну роботу, бажано у автоматичному режимі. Отримані координати й напрям дії вектору рівнодійної сили гідростатичного тиску на визначений елемент сферичної поверхні дозволяє проектувати надійні виконавчі елементи автоматичного керування у неперервному технологічному циклі водно-шламової системи збагачувальної фабрики.

Форма поверхні обрана у якості прикладу для ілюстрації практично безмежних можливостей універсального комп'ютерного ал-

горитму розрахунку за методом трьох команд K123, за умови що ми маємо аналітичні рівняння твірної й напямної криволінійної поверхні. За умови складного аналітичного визначення криволінійних елементів поверхні, Метод K123 має чисельний алгоритм реалізації розрахунку. Наведений змішаний варіант реалізації комп'ютерного розрахунку у тестовому прикладі в системі CAS MAXIMA – аналітичний й чисельний для горизонтальної поверхні й чисельний

ЛІТЕРАТУРА

1. **Константинов Ю. М.** Технічна механіка рідини і газу: Підручник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. К: Вища шк., 2002. 277 с.
2. **Константинов Ю. М.** Гідростатика. Приклади і задачі: навчальний посібник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа, Ю. Д. Копаниця. К: КНУБА, 2012. 112 с.
3. **Горчин Н. К.** Гідравліка в задачах / Н. К. Горчин, М. Д. Чертоусов. Л: Кубуч, 1927. 430 с.
4. **Maxima.** URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Maxima_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxima_(software))
5. **Maxima**, a Computer Algebra System. URL: <http://maxima.sourceforge.net/>
6. **Копаниця Ю.** Мультиваріантність розрахунку гідростатичного тиску в системі CAS MAXIMA [Електронний ресурс] / Ю. Копаниця, А. Муляр // Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія, 2018. Вип. 8. С. 50-51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pidteh_2018_8_11
7. **Копаниця Ю.** Розрахунок довгих трубопроводів у веб-інтерфейсі системи комп'ютерної алгебри MAXIMA / Ю. Копаниця, С. Наталенко // Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія, 2018. Вип. 8. С. 52-53. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pidteh_2018_8_12
8. **Edwards C. H., Penney D., Calvis D.** *Differential Equations and Boundary Value Problems: Computing and Modeling* Pearson Education Limited, 2014. ISBN-13: 978-0-321-81625-2
9. **Turyn L.** *Advanced Engineering Mathematics.* CRC Press, 2013. ISBN: 9781439834473. doi: [10.1201/b15750](https://doi.org/10.1201/b15750)
10. **Magrab E. B.** *An Engineer's Guide to Mathematica.* John Wiley & Sons Ltd, 2014. ISBN: 9781118821268
11. **Mathews J. H.** *Complex Analysis for Mathematics and Engineering.* Jones & Bartlett Learning, 2014. ISBN: 9781449604455
12. **Harris F. E.** *Mathematics for Physical Science and Engineering.* Academic Press, 2014. ISBN: 9780128010006
13. **Romano A. Marasco A.** *Classical Mechanics with Mathematica.* Birkhäuser Basel, 2018. ISBN: 9783319775944. doi: [10.1007/978-3-319-77595-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77595-1)
14. **Cryer C. W.** *A Math Primer for Engineers.* IOS Priess, 2014. ISBN: 9781614992981. doi: [10.3233/978-1-61499-299-8-i](https://doi.org/10.3233/978-1-61499-299-8-i)
15. **Mathews J. H., Howell R.** *Complex Analysis for Mathematics and Engineering.* Jones & Bartlett Learning, 2012. ISBN: 9781449604455
16. **Geveci T.** *Calculus I.* Cognella, 2012. ISBN: 9781935551423
17. **Gregor J., Tišer J.** *Discovering Mathematics: A Problem-Solving Approach to Mathematical Analysis with Mathematica and Maple.* Springer, 2011. ISBN: 9780857290540. doi: [10.1007/978-0-85729-064-9](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-064-9)
18. **Abramovich S.** *Exploring Mathematics with Integrated Spreadsheets in Teacher Education.* World Scientific, 2015. ISBN: 9789814689908. doi: [10.1142/9601](https://doi.org/10.1142/9601)
19. **Anastassiou G. A., Iatan I. F.** *Intelligent Routines: Solving Mathematical Analysis with Matlab, Mathcad, Mathematica and Maple.* Springer, 2013. ISBN: 9783642284748. doi: [10.1007/978-3-642-28475-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28475-5)
20. **Borwein J., Skerritt M. P.** *An Introduction to Modern Mathematical Computing with Mathematica,* 2012. ISBN: 9781461442523. doi: [10.1007/978-1-4614-4253-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4253-0)
21. **Bindner D., Erickson M.** *Student's Guide to the Study, Practice, and Tools of Modern Mathematics.* CRC Press, 2010. ISBN: 9781439846063.
22. **Копаниця Ю. Д.** Комп'ютерний розрахунок сили тиску. Універсальний алго-

ритм трьох команд – K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, Вип.18, 2012. С.148-163.

23. **Копаниця Ю. Д.** Розрахунок гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний алгоритм трьох команд – K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, Вип.20, 2012, С.105-119.

24. **Копаниця Ю. Д.** Аналіз виміру епюри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний метод розрахунку K123. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, 2013, Вип.21. С.165-180.

25. **Копаниця Ю. Д.** Інтегральні рівняння універсального методу трьох команд K123 // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, 2013, Вип.22. С.159-171.

REFERENCES

1. **Konstantinov, Y. M. (2002).** *Technical mechanics of liquid and gas: Textbook.* Kyiv: Higher school.
2. **Konstantinov, Y. M. (2012).** *Hydrostatics. Examples and problems: Textbook.* Kyiv: KNUBA.
3. **Gorchin, N. K. (1927).** *Hydraulics in problems.* Leningrad: Kubuch.
4. **Maxima.** Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Maxima_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxima_(software))
5. **Maxima,** a Computer Algebra System. Retrieved from <http://maxima.sourceforge.net/>
6. **Kopanytsia, Yu. (2018).** Multivariance of hydrostatic pressure calculation in CAS MAXIMA system. *Underwater technologies. Industrial and civil engineering, 8,* 50-51. - Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/pidteh_2018_8_11
7. **Kopanytsia, Yu. (2018).** Calculation of long pipelines in the web interface of the computer algebra system MAXIMA. *Underwater technologies. Industrial and civil engineering, 8,* 52-53. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/pidteh_2018_8_12
8. **Edwards, C. H., Penney, D., & Calvis, D. (2014).** *Differential Equations and Boundary Value Problems: Computing and Modeling* Pearson Education Limited. ISBN-13: 978-0-321-81625-2

9. **Turyn, L. (2013).** *Advanced Engineering Mathematics.* CRC Press. ISBN: 9781439834473. doi: [10.1201/b15750](https://doi.org/10.1201/b15750)
10. **Magrab, E. B. (2014).** *An Engineer's Guide to Mathematica.* John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 9781118821268
11. **Mathews, J. H. (2014).** *Complex Analysis for Mathematics and Engineering.* Jones & Bartlett Learning. ISBN: 9781449604455
12. **Harris, F. E. (2014).** *Mathematics for Physical Science and Engineering.* Academic Press. ISBN: 9780128010006
13. **Romano, A. & Marasco, A. (2018).** *Classical Mechanics with Mathematica.* Birkhäuser Basel. ISBN: 9783319775944. doi: [10.1007/978-3-319-77595-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77595-1)
14. **Cryer, C. W. (2014).** *A Math Primer for Engineers.* IOS Priess. ISBN: 9781614992981. doi: [10.3233/978-1-61499-299-8-i](https://doi.org/10.3233/978-1-61499-299-8-i)
15. **Mathews, J. H., & Howell, R. (2012).** *Complex Analysis for Mathematics and Engineering.* Jones & Bartlett Learning. ISBN: 9781449604455
16. **Geveci, T. (2011).** *Calculus I.* Cognella. ISBN: 9781935551423
17. **Gregor, J., Tišer, J. (2011).** *Discovering Mathematics: A Problem-Solving Approach to Mathematical Analysis with Mathematica and Maple.* Springer. ISBN: 9780857290540. doi: [10.1007/978-0-85729-064-9](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-064-9)
18. **Abramovich, S. (2015).** *Exploring Mathematics with Integrated Spreadsheets in Teacher Education.* World Scientific. ISBN: 9789814689908. doi: [10.1142/9601](https://doi.org/10.1142/9601)
19. **Anastassiou, G. A., & Iatan, I. F. (2013).** *Intelligent Routines: Solving Mathematical Analysis with Matlab, Mathcad, Mathematica and Maple.* Springer. ISBN: 9783642284748. doi: [10.1007/978-3-642-28475-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28475-5)
20. **Borwein, J., & Skerritt, M. P. (2012).** *An Introduction to Modern Mathematical Computing with Mathematica.* Springer Undergraduate Texts in Mathematics and Technology. ISBN: 9781461442523. doi: [10.1007/978-1-4614-4253-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4253-0)
21. **Bindner, D., & Erickson, M. (2010).** *Student's Guide to the Study, Practice, and Tools of Modern Mathematics.* CRC Press. ISBN: 9781439846063.
22. **Kopanytsia, Yu. D. (2012).** Computer calculation of pressure force. Universal algorithm of three commands - K123. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic, 18,* 148-163.

23. **Копаньтсія, Ю. Д. (2012).** Calculation of hydrostatic pressure on a curved surface. Universal algorithm of three commands - K123. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 20, 105-119.

24. **Копаньтсія, Ю. Д. (2013).** Analysis of the measurement of the plot of hydrostatic pressure on the curved surface. Universal

method of calculation K123. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 21, 165-180.

25. **Копаньтсія, Ю. Д. (2013).** Integral equations of the universal method of three commands K123. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 22, 159-171.

Determination of hydrostatic pressure force on a spherical surface under conditions of relative equilibrium of fluid using method K123

Yuri Kopanytsia

Abstract. Lack of modern universal computer algorithms for analytical and numerical modeling as well as for calculation of hydrostatic pressure force proves to be a problem in designing certain component parts of the water-sludge system of the concentrator.

Determination of the vector parameters of the hydrostatic pressure resultant force, namely, the magnitude, direction and calculation of the coordinates of the pressure force center in three dimensions, allows to design reliable components for product unloading in such processes as lighting, thickening and separation in systems using centrifugal acceleration under conditions of relative equilibrium of fluid.

Author's universal algorithm, the method of three commands K123, has been offered to calculate the vector parameters of the hydrostatic pressure force on a curved surface under conditions of relative equilibrium of fluid. Calculation of the pressure force on an arbitrary surface component has been presented on the example of pressure on a spherical surface rotating with a certain frequency.

Presented algorithms allow to increase the efficiency in designing the component parts of automatic control for unloading the lightened or thickened product in the concentrator water-sludge systems.

Keywords: method of three commands; K123; hydrostatic pressure; relative equilibrium of fluid; coordinates of pressure force center.

Стаття надійшла до редакції 13.11.2020