ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 59 2026 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

DOI: 10.71167/uaceg.2026.590306

*Получена: 15.04.2026 г.*
*Приета: 15.05.2026 г.*

# ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРАВЛИЧЕН УДАР В НАПОРНИ ТРЪБОПРОВОДИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ПРОГРАМИТЕ НУАСГ И ИМХУАСГ

**Б. Цанков**[1]

***Ключови думи:*** *хидравличен удар, напорни тръбопроводи, метод на характеристиките, НУАСГ, ИМХУАСГ, числено моделиране, противоударна защита*

**РЕЗЮМЕ**

Статията представя двете компютърни програми на български език за числено изследване на хидравличния удар в напорни тръбопроводни системи – НУАСГ (Начални Условия за хидравличния удар в нАпорни Системи, малки и Големи) и ИМХУАСГ (Интерактивно Моделиране на Хидравличен УдАр в напорни Системи, малки и Големи), разработени от В. Цачков и Б. Цанков [1]. Описани са математическят модел, системите от типове възли и участъци, методиката за съвместното им прилагане и препоръчителната 8-стъпкова процедура за анализ. С помощта на скрийншоти от интерфейсите е онагледено практическото въвеждане на входни данни и интерпретацията на резултатите – обвивни криви на максималните и минималните налягания и развитие на напора $H(t)$ в избрани възли.

## 1. Въведение

Хидравличният удар е нестационарен хидравличен процес, при който резките промени в скоростта на течението предизвикват значителни колебания на налягането в напорните тръбопроводи. Основните причини за неговото възникване са аварийното спиране на помпени агрегати и бързото затваряне на затворни органи [1, 2]. Последиците могат да бъдат тежки: недопустими свръхналягания, вакуумни налягания, кавитационно

[1] Борис Цанков, доц. д-р инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: btzankov_fhe@uacg.bg

разкъсване на водната струя, смачкване на тръби, умора на материала и аварии по хидравличните машини.

Анализът на хидравличния удар е задължителна проектна дейност при всяка напорна тръбопроводна система [3, 4]. Класическата теория – методът на характеристиките и формулата на Жуковски – е широко известна [2, 5, 6], но практическото ѝ приложение в сложни тръбопроводни системи изисква специализиран компютърен софтуер. Съществуват различни програми в световен мащаб [7, 8], но тяхното ползване нерядко е затруднено от езиковата бариера и необходимостта от задълбочено запознаване с техните специфични изисквания и особености.

В настоящата статия са описани две програми на български език – НУАСГ и ИМХУАСГ, разработени от проф. В. Цачков и доц. Б. Цанков, описани в монографията [1] и потребителските ръководства [9, 10]. Програмите са плод на дългогодишен изследователски опит в областта на хидравличния удар [11, 12] и на практиката по проектиране на напорни тръбопроводни системи. Целта на статията е да представи концептуалната им рамка, основните функции и работната процедура по начин, ориентиран към изследователите и практикуващите хидроинженери.

## 2. Математически модел

Хидравличният удар се описва с две частни диференциални уравнения – на движението и на непрекъснатостта – с неизвестно водно количество, $Q$ и кота на напорната линия, $H$ [1, 6]:

$$g\frac{\partial H}{\partial s}+\frac{\partial Q}{\partial t}+g\frac{Q|Q|}{A^2C^2R}=0\,; \tag{1}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial s}=0, \tag{2}$$

където $H$ ($s$, $t$) е напорът (m);

$Q$ ($s$, $t$) – водното количество (m³/s);

$s$ – пространствена координата по оста на тръбата (m);

$t$ – време (s);

$a$ – скорост на разпространение на ударната вълна (m/s);

$g$ – земното ускорение (m/s²);

$A$ – площта на напречното сечение на тръбата (m²);

$C$ – скоростният множител на Шези ($m^{0,5}$/s);

$R$ – хидравличният радиус на тръбата (m).

Стойността на $a$ зависи от модулите на еластичност на водата и на материала, от който е произведена тръбата, от диаметъра, $D$ и дебелината на стената, $\delta$ [1, 4]. Ориентировъчно $a$ варира от 230 – 430 m/s за ПЕВП тръби до 1000 – 1350 m/s за тръби от ковък чугун.

Максималното свръхналягане при мигновено спиране на течението се определя по формулата на Жуковски [1, 13]:

$$\Delta H=a\frac{\Delta Q}{Ag},\ \text{m}\,. \tag{3}$$

Системата от уравнения се решава числено по метода на характеристиките с равномерна пространствено-времева мрежа [1, 6]. Задължително условие е $\Delta x_i = a_i \Delta t$, т.е. дължината на подучастъка и вълновата скорост в участък $i$ трябва да са съвместими с единната времева стъпка $\Delta t$. Когато поради различни дължини на участъците условието не може да бъде точно изпълнено, скоростта на вълната се коригира незначително – с ограничено влияние върху точността на резултатите.

ИМХУАСГ моделира и кавитационното разкъсване на водната струя: приема се, че разкъсването настъпва при налягане под – 8,00 m воден стълб. Симулират се промените в обема на разкъсванията и свръхналяганията при тяхното затваряне [1].

## 3. Програма НУАСГ

НУАСГ е програма за моделиране на стационарно течение в напорни тръбопроводни системи. Основното ѝ предназначение е да осигури началните условия за анализа на хидравличния удар с ИМХУАСГ, но може да се използва и самостоятелно за хидравлично изчисляване на тръбопроводи и мрежи [1, 10]. Изчислява разпределението на водните количества, скоростите и налягането; при наличие на помпи – и работната точка, КПД и смукателната височина.

Математическият модел е система от нелинейни уравнения с неизвестни $H$ по възлите, решавана итеративно чрез метод на последователни приближения [1]. Могат да се прилагат трите най-разпространени формули за загуби на напор по дължина: Манинг, Хейзън–Уилямс и Дарси–Вайсбах. При успешна сходимост се извежда потвърдително съобщение.

За описание на хидравличната система двете програми работят с понятията „възел“ и „участък“ [1, 9, 10]. Всеки възел е точка с единна стойност на напора $H$. Във възела е позиционирано системно устройство или е налице важна промяна в наклона на терена. Всеки участък е тръба с постоянни параметри, заключена между два съседни възела. Типовете възли, поддържани от НУАСГ, и тяхното съответствие с ИМХУАСГ са дадени в табл. 1.

**Таблица 1. Типове възли в НУАСГ и еквивалентът им в ИМХУАСГ [8, 10]**

| Тип | Описание | Еквивалент в ИМХУАСГ |
|---|---|---|
| 0 | Прост възел (тръбно съединение или затворен край) | Тип 0 |
| 7 | Резервоар или свободно изтичане в атмосферата | Тип 7 |
| 8 | Изтичане под напор (наставка, дъждовален апарат) | Тип 8 |
| 13 – 14 | Помпи, работещи с номинални обороти | Тип 13, 14 |
| 25 – 26 | Водноелектрическа централа в експлоатация | Тип 25, 26 |
| 32 | Вътрешна помпа – бустер (с обратна клапа) | Тип 32 |
| 34 | Консумация с фиксирано водно количество | Тип 34 |
| 35 – 37 | Избор на помпа (само НУАСГ) | – |
| 48 | Вътрешна помпа с програмируем затворен орган | Тип 48 |

НУАСГ работи с осем типа участъци: тип 0 (тръбопровод), тип 1 (концентрирана местна загуба), тип 2 (обратна клапа), тип 3 (затворен участък), тип 4 (вътрешна помпа –

бустер), тип 5 (редуцир вентил), тип 6 (поддържащ налягането вентил) и тип 7 (регулиращ вентил) [1, 10]. Входните данни за тръбите (диаметър, коефициент на загуби) се въвеждат еднократно в таблицата „Асортимент от тръби“, а за всеки участък се посочва само референтен номер – така се избягва ненужното повторение на едни и същи данни.

Резултатите от НУАСГ обхващат: водни количества и загуби на напор по участъците; коти на напорната линия, свободен напор и налягане по възлите; работна точка, КПД, смукателна височина и мощност на помпите. Изходният *.cod файл съдържа едновременно входните данни и резултатите в ASCII формат и е пряко съвместим с ИМХУАСГ.

## 4. Програма ИМХУАСГ

ИМХУАСГ е програма за моделиране на хидравличен удар в напорни тръбопроводни системи [1, 9]. Тя симулира преходния процес и показва резултатите в числена и графична форма по време на самото изпълнение. Програмата не е ограничена по вида на системата: могат да се анализират прости и сложни водопроводи, разклонени и сключени мрежи, с различни видове помпи, резервоари и противоударни съоръжения. Специфичните за ИМХУАСГ типове възли са дадени в табл. 2.

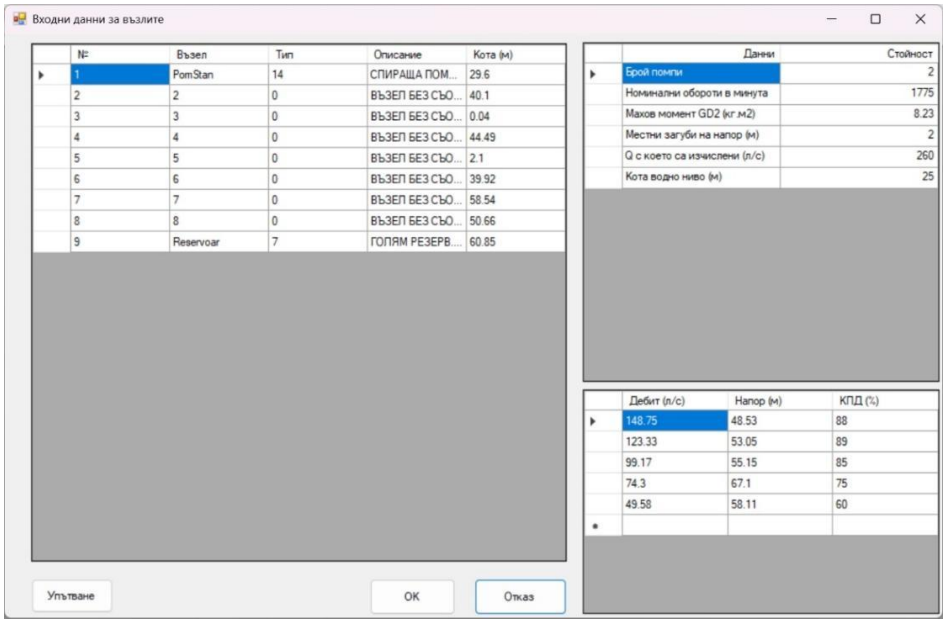
**Таблица 2. Специфични типове възли на ИМХУАСГ, допълнителни спрямо НУАСГ [1, 9]**

| Тип | Описание на възела | Специфика / предназначение |
|---|---|---|
| 1 | Виндкесел | Противоударно средство |
| 2 | Водна кула | Противоударно средство |
| 3 – 4 | Открит / затворен резервоар за впускане на вода | Защита срещу разкъсване |
| 5 – 6 | Въздушник (впускане и изпускане / задържане) | Защита срещу разкъсване |
| 10 – 12 | Удароубивател / ударогасител | Ограничаване на свръхналягане |
| 14 | Спираща помпа с обратна клапа | Основна причина за удара |
| 16 | Спираща помпа с програмируем затворен орган | Контролирано спиране |
| 18 | Спираща помпа с виндкесел | Комплексна защита |
| 21 – 22 | Спираща помпа с резервоар за впускане на вода | Защита срещу разкъсване |
| 25 – 27 | Водноелектрическа централа | Затваряне / пуск на турбини |
| 34 | Непроменяща се консумация по време на удара | Фиксиран дебит |

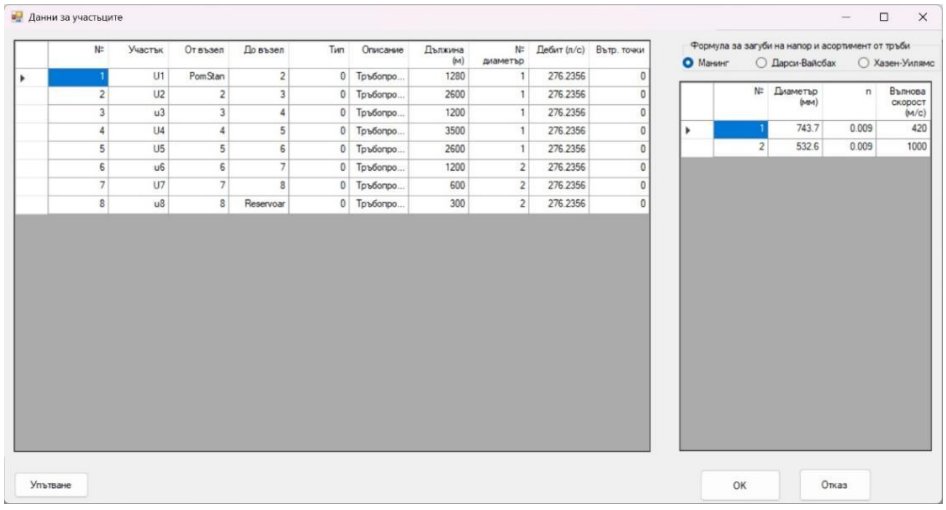
Главното меню на ИМХУАСГ съдържа 7 опции: Файл, Входни данни, Начални условия, Подготовка, Моделиране, Резултати и Упътвания. Входните данни за възлите се въвеждат в таблица с колони Възел, Тип и Кота (m). За всеки тип, изискващ допълнителни параметри, се попълва допълнителна таблица вдясно. На фиг. 1 е показан прозорецът за данните за възлите при реален пример: система от 9 възела с помпена станция (PomStan, тип 14 – спираща помпа с обратна клапа) и краен резервоар (Reservoar, тип 7). Вдясно се виждат параметрите на помпата: 2 помпи в паралел, 1775 об./мин, махов момент $GD^2$ = 8,23 kg·m², местни загуби и пет работни точки от характеристичната крива $Q$–$H$–$\eta$.

Входните данни за участъците (фиг. 2) се въвеждат в две таблици: „Данни за участъците“ (ляво) и „Формула за загуби на напор и асортимент от тръби“ (дясно). В

примера фигурата показва 8 участъка тип 0 (тръбопроводи) с дължини от 300 до 3500 m. Таблицата вдясно дефинира два диаметъра (743,7 mm и 532,6 mm) по формулата на Манинг ($n$ = 0,009) и вълновите скорости $a$ = 420 и 1000 m/s. Вълновата скорост е специфичен за ИМХУАСГ параметър, необходим за моделирането на удара, и не се въвежда в НУАСГ.




**Фиг. 1. Входни данни за възлите в ИМХУАСГ: помпена система с 9 възела (тип 14 за спираща помпа с обратна клапа, тип 7 за краен резервоар). Вдясно – параметри на помпата и характеристична крива *Q–H–η***



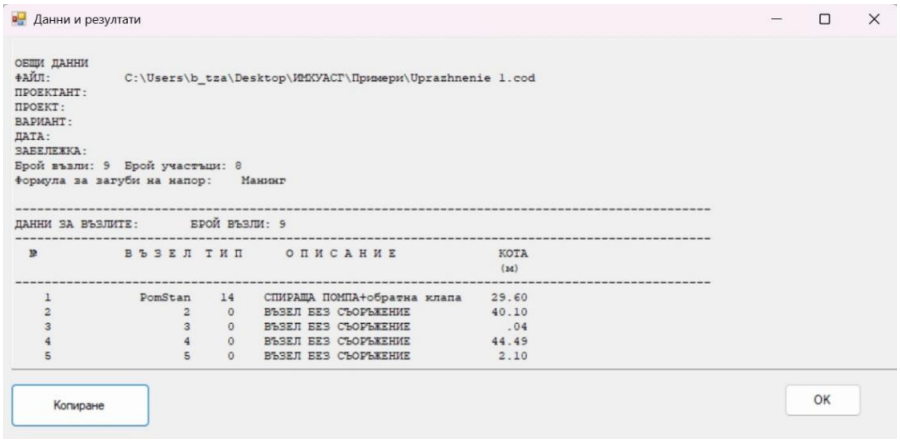

**Фиг. 2. Входни данни за участъците в ИМХУАСГ: 8 тръбопровода (тип 0) с дължини и диаметри. Вдясно – асортимент от тръби с диаметри, коефициент на Манинг *n* и вълнови скорости *a* (m/s)**

ИМХУАСГ работи с пет типа участъци (тип 0 – 4), идентични с първите пет в НУАСГ, с добавена четвърта колона „Вълнова скорост“ в таблицата „Асортимент от тръби“ [1, 9].

Подменюто „Подготовка“ съдържа командите „Дискретизация“ и „Продължителност и визуализация“. Командата „Дискретизация“ предлага автоматично деление на участъците на подучастъци, осигуряващо условието $\Delta x_i = a_i \Delta t$. Показва се разликата (%) между реалната и коригираната вълнова скорост, а потребителят може да регулира броя на подучастъците или да въведе допълнителни възли в дългите участъци за намаляване на корекциите [1].

Командата „Продължителност и визуализация“ позволява задаване на теоретичния период $4L/a$, минималната, максималната и предопределената продължителност на моделирането, а също и избор на траектория от участъци и на възли за визуализация. Препоръчително е потребителят да следи хода на процеса и сам да прекъсне моделирането при настъпване на затихване [1].

Изходният текстов файл („Данни и резултати“, фиг. 3) съдържа в ASCII формат всички въведени данни – тип и кота на всеки възел – последвани от резултатите за дебити, скорости и напори. Файлът може да се копира в MS Word или MS Excel и служи като документация на изчислението. Важно е да се отбележи, че всяка редакция на *.cod файл трябва да се извършва изключително чрез менюто „Входни данни“ на програмата, а не с външен текстов редактор [9].



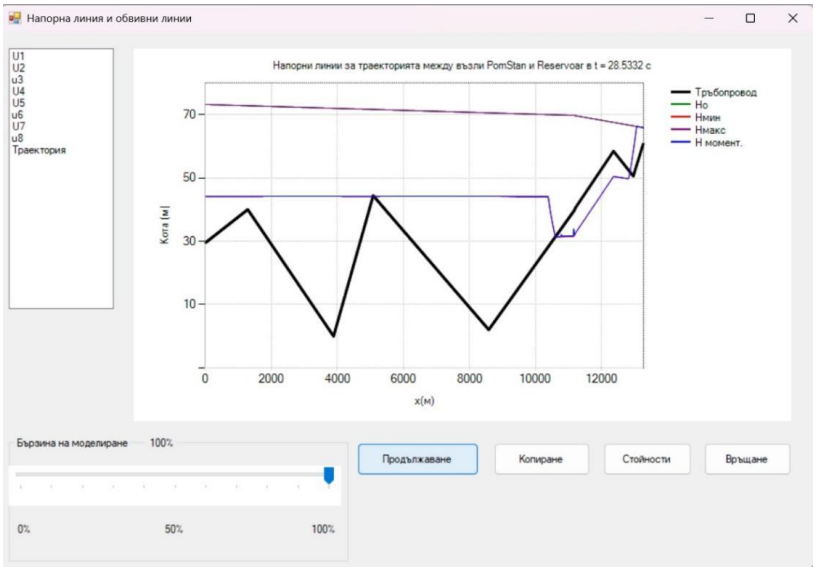

**Фиг. 3. Текстов изход „Данни и резултати“ на ИМХУАСГ: списък на възлите с техния тип и кота. Файлът е в ASCII формат и е съвместим с НУАСГ (*.cod)**

## 5. Визуализация по време на моделирането

По време на изпълнението ИМХУАСГ предлага три режима на визуализация [1, 9]. Числените резултати показват непрекъснато в таблица за всяка времева стъпка: времето $t$ (s), напора $H$ (m), водното количество $Q$ (m³/s) и обема на разкъсване (m³) за предварително избрани възли.

Развитие в участъци (фиг. 4) – показва в реално време профила на тръбопровода (котата на оста), началната напорна линия $H_0$ и моментната напорна линия $H_{\text{момент}}$, обновявана при всяка стъпка, заедно с обвивните криви на максималните ($H_{\max}$) и минималните ($H_{\min}$) налягания. Може да се избере един участък или траектория от

последователни участъци. На примера на фиг. 4 са видни: нивелета с вариращ наклон, начална напорна линия $H_0$ (зелена) близо до котата на терена, обвивната крива на максималните налягания $H_{max}$ (виолетова) и моментно положение $H_{момент}$ (синя), зафиксирано при $t$ = 28,5 s. Характерното рязко спадане на минималните налягания в средната третина на тръбопровода визуализира разкъсване на водната струя в тази зона.




**Фиг. 4. Напорна линия и обвивни криви по траектория PomStan–Reservoar при $t$ = 28,5 s. $H_0$ – начална напорна линия (зелена); $H_{max}$ – максимална обвивна (виолетова); $H_{min}$ – минимална обвивна (червена); $H_{момент}$ – моментна напорна линия (синя)**




**Фиг. 5. Развитие на напора $H$ ($t$) във възел 6. Ясно се различават: стационарен режим ($H$ = 30 m), рязко спадане до вакуумни налягания след спиране на помпата и последващо възстановяване с флуктуация и пик $H_{max} \approx$ 35 m**

Развитие във възел (фиг. 5) – показва графиката $H(t)$ за избран възел: по хоризонталната ос е времето (s), по вертикалната – напорът (m). На показания пример – възел 6 – ясно се различават три фази: стационарното течение при $H$ = 30 m до $t \approx 20$ s; рязко спадане до налягания под – 8,00 m при спиране на помпата; след $t \approx 30$ s – възстановяване на напора с осцилации, достигащи максимум $H_{max} \approx 35$ m около $t$ = 60 s. Тази информация е ключова за установяване на критичните моменти от хидравличния удар.

Всички графики могат по всяко време да се копират в клипборда и да се поставят в MS Word или MS Excel – в графичен вид или като числова таблица [9]. Подменюто „Резултати“ предоставя крайни данни по възли, по участъци и по специалните възли. За специалните възли се показват параметри за оценка на правилното оразмеряване на противоударните съоръжения – напр. максималните обороти на обратен ход и максималният обратен дебит при спираща помпа.

## 6. Препоръчителна процедура за анализ

Съвместното приложение на НУАСГ и ИМХУАСГ следва ясно дефинирана последователност [1], основана на четири основни фази: А) определяне на стационарното течение; Б) моделиране с НУАСГ; В) прехвърляне на резултатите в ИМХУАСГ; Г) моделиране на хидравличния удар и проектиране на защита. Пълната 8-стъпкова процедура е систематизирана в табл. 3.

**Таблица 3. Препоръчителна 8-стъпкова процедура за анализ на хидравличен удар [8]**

| Стъпка | Действие |
|---|---|
| 1 | Схематизиране на системата: представяне чрез възли и участъци. |
| 2 | Въвеждане на входните данни в НУАСГ. |
| 3 | Изпълнение на НУАСГ; проверка на водни количества, напори и работна точка на помпата. |
| 4 | Запис на изходния *.cod файл от НУАСГ. |
| 5 | Зареждане на *.cod в ИМХУАСГ; допълване с вълнова скорост $a$ и махов момент $GD^2$. |
| 6 | Моделиране на хидравличния удар без защитни средства. |
| 7 | Проверка дали тръбите издържат максималните и минималните налягания. |
| 8 | При необходимост: добавяне на защитни съоръжения (промяна на типа на възела) и повторно моделиране. |

Въвеждането на защитни съоръжения в стъпка 8 се реализира чрез промяна на типа на съответния възел: за виндкесел при спираща помпа – тип 14 се заменя с тип 18; за въздушник в тръбопровода – тип 0 се заменя с тип 5 или 6 [1]. Различни видове, размери и местоположения на защитните съоръжения могат да се изпробват итеративно, докато не се постигнат приемливи налягания.

Директното въвеждане на данни в ИМХУАСГ без предварително изпълнение на НУАСГ е теоретично възможно, но изисква ръчно задаване на точните дебити по всички участъци – задача, практически изключително трудна при сложни системи. Препоръчителният подход е двете програми да се използват в тандем [1, 9, 10].

## 7. Заключение

НУАСГ и ИМХУАСГ представляват интегрирана инженерна среда на български език за пълен анализ на хидравличния удар в напорни тръбопроводни системи. НУАСГ осигурява точните начални условия чрез итеративно решаване на нелинейните уравнения на стационарното течение, а ИМХУАСГ моделира преходния процес по метода на характеристиките – включително кавитационно разкъсване, широк набор от типове защитни съоръжения и интерактивна визуализация в реално време.

Двете програми работят с обща система от типове възли и участъци и обменят данни чрез съвместими *.cod файлове. Препоръчителната 8-стъпкова процедура осигурява систематичен подход от схематизирането до проектирането на ефективна защита. Програмите са приложими за помпени тласкателни тръбопроводи, гравитачни водопроводи, напоителни мрежи и водноелектрически централи и са достъпни за инженери без специализирана математическа подготовка в числените методи.

### БИБЛИОГРАФИЯ


1. *Tzatchkov, V., Tzankov, B.* WATER HAMMER IN PRESSURE SYSTEMS. Analysis, Modeling and Protection. DGI Design Ltd., ISBN 978-619-04-0610-5, 2025.

2. *Chaudhry, M. H.* Applied Hydraulic Transients. 3rd ed. Springer, New York, 2014.

3. *Kazakov, B. et al.* Spravochnik za hidravlichni izchisleniya na vodoprovodyashti saorazheniya i sistemi, KIIP, 2008.

4. *Marinov, E., Kazakov, B., Maradzhieva, M.* Hidravlika. Izdatelstvo VIAS, 1994.

5. *Thorley, A.* Fluid Transients in Pipeline Systems. D&L George Ltd., 1991.

6. *Wylie, E. B., Streeter, V. L.* Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall, New Jersey, 1993.

7. *Rossman, L. A.* EPANET 2 User's Manual. US EPA, Cincinnati, OH, 2000.

8. *Stephenson, D.* Pipeline Design for Water Engineers. Elsevier, Amsterdam, 1981.

9. *Tzatchkov, V., Tzankov, B.* Rakovodstvo na polzvatelia – programa IMHUACEG. 2024.

10. *Tzatchkov, V., Tzankov, B.* Rakovodstvo na polzvatelia – programa NUACEG. 2024.

11. *Tzatchkov, V., Momchilov, B., Koleva, L.* Opit ot prilozhenieto na matematicheski modeli za izsledvaneto na hidravlichnia udar v napoitelnite mrezhi. Mevdunaroden simpozium, Sofia, 1983.

12. *Tzatchkov, V., Momchilov, B., Koleva, L.* Otnosno izsledvaneto na hidravlichnia udar v razkloneni mrezhi. Izvestia na Institut apo hidrotehnika i melioratzii, 135/141, 1983.

13. *Marinov, E.* Chisleno modelirane v hidrotehnikata s EIM. Tehnika, 1986.

# NUMERICAL MODELLING OF WATER HAMMER IN PRESSURE PIPELINES USING THE NUACEG AND IMHUACEG SOFTWARE

**B. Tzankov**[1]

***Keywords:*** *water hammer, pressure pipelines, method of characteristics, NUACEG, IMHUACEG, numerical modelling, transient protection*

## ABSTRACT

This paper presents two computer programs in Bulgarian for the numerical analysis of water hammer in pressurised pipeline systems – NUACEG and IMHUACEG, developed by V. Tzatchkov and B. Tzankov [1]. The mathematical models, node- and segment-type systems, joint application methodology, and the recommended 8-step analysis procedure are described. Screenshots of the program interfaces illustrate data entry for a real pumping system – node types, pipe segment characteristics, including wave speed – and the interpretation of results: pressure envelope curves along a pipeline trajectory and transient pressure development $H$ ($t$) in a selected node.

[1] Boris Tzankov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Hydraulics and Hydrology", Faculty of Hydraulic Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: btzankov_fhe@uacg.bg