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.2026.590307

*Получена: 07.05.2026 г.*
*Приета: 18.05.2026 г.*

# МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРАВЛИЧЕН УДАР В ХЕТЕРОГЕННИ ВОДОПРОВОДИ – АНАЛИЗ НА КРИТИЧНИТЕ НАТОВАРВАНИЯ ВЪРХУ СЪЩЕСТВУВАЩА ИНФРАСТРУКТУРА

**Б. Цанков**[1]

***Ключови думи:*** *хидравличен удар, хетерогенни водопроводи, чугунени тръби, стоманени тръби, оценка на риск, числено моделиране, НУАСГ, ИМХУАСГ*

## РЕЗЮМЕ

Настоящата статия разглежда инженерното предизвикателство, свързано с оценката на безопасността при поетапната рехабилитация на съществуващи водоснабдителни системи. Обект на изследване е хетерогенен главен довеждащ водопровод с дължина 6493,1 m, в който новопроектирани участъци от сферографитен чугун DN800 се интегрират с над 50-годишни стоманени тръби ø920/6 и стари чугунени тръби ø800, изградени в 70-те години на XX век. Чрез програмите НУАСГ и ИМХУАСГ е извършено числено моделиране на хидравличния удар при повече от 10 сценария, отчитащи различните вълнови скорости на материалите (1054 m/s за чугун, 908 m/s за стомана) и необходимостта от дроселиране поради ниската грапавина на новите тръби. Резултатите доказват, че при при преминаване на водното количество през енергогасителя (ЕГ) системата е безопасна – максималните налягания не надвишават 150 m$H_2O$. При байпасиране на енергогасителя и ударно затваряне на спирателния кран (СК) тип бътерфлай DN800 при ПСПВ, обаче, се генерират свръхналягания до 219,43 m$H_2O$, надвишаващи теоретично допустимото за стоманените тръби ø920/6 от 214,03 m$H_2O$. Изследването обосновава необходимостта от задължителен ултразвуков дефектоскопски контрол на старите участъци преди пускането им в експлоатация.

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

## 1. Въведение

ВиК инфраструктурата в много европейски държави е изградена преди 50 – 70 години и е навлязла в активната фаза на амортизация. Поетапната рехабилитация, при която само износените участъци се заменят с нови тръби, поражда хетерогенни системи, в едно и също трасе, съчетаващи елементи с различна вълнова скорост, дебелина на стената и якостни характеристики [1, 2]. При такива условия анализът на хидравличния удар придобива особено значение: ударната вълна се отразява и трансформира на всяка граница, породена от разлика в диаметъра и материала, а старите тръби могат да са отслабнали вследствие на корозия и умора на материала [1, 3].

Допълнителна специфика на хетерогенните системи е разликата в хидравличното съпротивление на новите и старите тръби. Новопроектираните чугунени тръби с вътрешна циментова замазка имат абсолютна грапавина $\Delta \approx 0{,}1$ mm срещу значително по-голяма грапавина на десетилетия експлоатираните стоманени тръби. Тази разлика обуславя начален дебит, надвишаващ проектното водно количество при напълно отворени спирателни кранове, и свързаната с него необходимост от постоянно дроселиране – фактор, пряко влияещ върху интензивността на преходните процеси [4, 5].

Настоящото изследване има за цел да оцени риска от хидравличен удар в главния водопровод от яз. „Асеновец“ до ПСПВ на гр. Сливен. За целта е направено компютърно моделиране (с програмите НУАСГ и ИМХУАСГ [4, 5]), което отчита реалната скорост на вълната, времето за затваряне на спирателните кранове и здравината на съществуващите тръби.

## 2. Обект на изследването

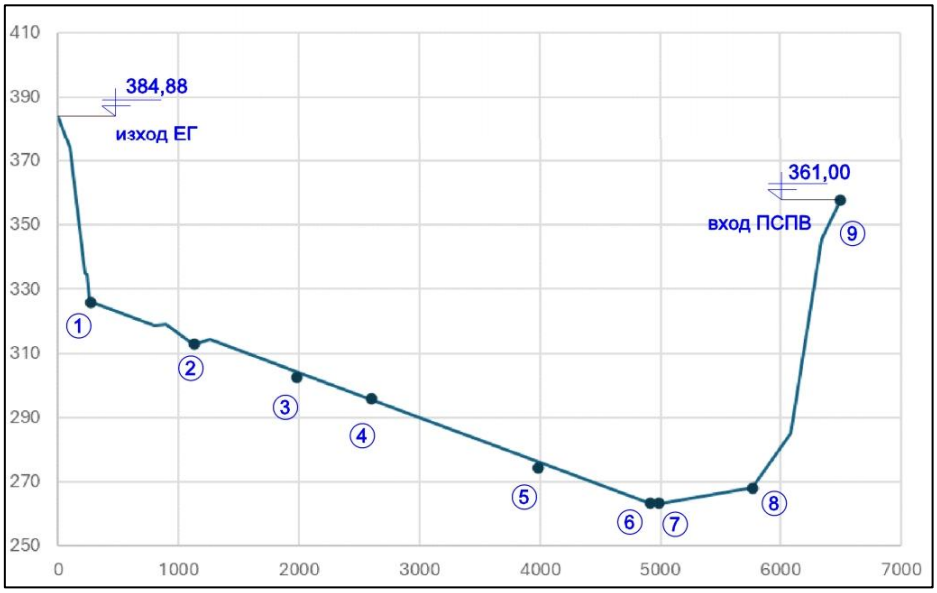
Обект на изследването е главният довеждащ водопровод от яз. „Асеновец“ до Пречиствателна станция за питейни води (ПСПВ) на гр. Сливен с обща дължина 6493,1 m [6]. Трасето е нееднородно: новопроектираните участъци са от сферографитен чугун DN800 с вътрешен диаметър 818,6 mm и дебелина на стената 11,7 mm, а три съществуващи участъка са от стомана ø920/6 и чугун ø800, изградени през 70-те години на XX век. Началната точка на разглеждания водопровод (изход от енергогасителя) е с кота 384,88 m, а крайната му точка (утаителят на ПСПВ) е с кота 361,00 m, което дава денивелация от 23,88 m при статично водно ниво.

Съществуващите стоманени участъци ø920/6 включват: (1) трасето от водовземната кула на яз. „Асеновец“ до Шахта 1 с разходомер (което остава извън обсега на моделирания водопровод), и (2) участъка между кранова шахта при т. 4993А.9 и кранова шахта при т. 4993А.8 с дължина около 764 m (най-ниската част от нивелетата на разглеждания водопровод). Поради неизвестното им актуално якостно състояние след 50 години експлоатация тези участъци представляват критичното звено на системата при евентуален хидравличен удар.

По дължината на трасето между енергогасителя и ПСПВ се предвижда изграждане на 9 нови кранови шахти; 2 съществуващи кранови шахти остават активни. Спирателните кранове (СК) са от два различни типа: шест клапи тип „бътерфлай“ (DN600 и DN800) и пет шибърни крана DN600 (три в Кранова шахта 4, и по един преди и след пресичането на Асеновска река).

Според техническите данни на електрозадвижките, времената за затваряне са: 152 s (за клапи тип „бътерфлай“ DN800), 166 s (за клапи тип „бътерфлай“ DN600) и 270 s (за шибър DN600). Приема се линеен закон за затваряне. Проектното водно количество е $Q = 800$ l/s.

Фигура 1 представя разположението на крановите шахти и спирателните кранове по нивелетата на изследвания тръбопровод.




**Фиг. 1. Разположение на крановите шахти по нивелетата на изследвания тръбопровод**

*1 – Кранова шахта № 4; 2 – Кранова шахта с изпускател № 1; 3 – Кранова шахта с изпускател № 2; 4 – Кранова шахта с изпускател № 3; 5 – Кранова шахта с изпускател № 3; 6 – Шахта преди Асеновска река; 7 – Шахта след Асеновска река; 8 – Шахта в т. 4993А.9; 9 – Шахта при ПСПВ*

## 3. Теоретична постановка и методология

### 3.1. 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, 2]:

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

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

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).

Максималното свръхналягане при мигновено спиране по формулата на Жуковски [1, 2]:

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

Системата (1) – (2) се решава по метода на характеристиките с пространствено-времева мрежа при условие $\Delta x_i = a_i \Delta t$ [1, 6, 8]. При хетерогенен тръбопровод вълновата скорост се коригира незначително за всеки участък, за да се постигне единна $\Delta t$ [1].

## 3.2. Вълнова скорост и якост на тръбите

Вълновата скорост за тънкостенна тръба ($D/\delta > 25$) по [1, 2]:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1+\dfrac{DE_{\text{вода}}}{\delta E_{\text{мат.}}}}}, \tag{4}$$

където $a_0$ е скоростта на звука във водата (m/s);

$D$ – вътрешният диаметър на тръбата (mm);

$\delta$ – дебелина на стената на тръбопровода (mm);

$E_{\text{вода}}$ – модул на обемната еластичност на водата ($N/m^2$);

$E_{\text{мат.}}$ – модул на обемната еластичност на материала на тръбопровода ($N/m^2$).

Таблица 1 показва изчислените вълнови скорости за трите материала.

**Таблица 1. Вълнови скорости в участъците на трасето**

| **Материал** | $\boldsymbol{D_{\text{втр.}}}$ **(mm)** | $\boldsymbol{\delta}$ **(mm)** | $\boldsymbol{E_{\text{мат.}}}$ **(MPa)** | $\boldsymbol{a}$ **(m/s)** |
|---|---|---|---|---|
| Сферографитен чугун DN800 | 818,6 | 11,7 | 170000 | 1054,65 |
| Стомана ø920/6 | 908 | 6 | 210000 | 908,32 |

Допустимото налягане на съществуващите стоманени тръби ø920/6 е изчислено при приемане на стомана A53 Gr. B (граница на еластичност 241,32 MPa) по формулата:

$$P = \frac{2.S.T}{OD.SF}, \tag{5}$$

където $P$ е допустимото налягане (MPa);

$S$ – границата на еластичност на съответния вид стомана (MPa);

$T$ – дебелината на стената на тръбата (mm);

$OD$ – външният диаметър на тръбата (mm);

$SF$ – коефициентът на сигурност.

Таблица 2 показва извършените изчисления. Приети са граница на еластичност на съответния вид стомана 241,32 MPa и следните две стойности на коефициента на

сигурност: 2,00 (за нормална работа) и 1,50 (за хидравличен удар), съгласно действащите норми и препоръки.

**Таблица 2. Допустимо налягане за стоманени тръби ø920/6 (A53 Gr. B)**

| *OD* (mm) | *T* (mm) | *SF* | Доп. налягане (MPa) | Доп. налягане ($mH_2O$) | Условие |
|---|---|---|---|---|---|
| 920 | 6 | 2,00 | 1,57 | 160,52 | Нормална работа |
| 920 | 6 | 1,50 | 2,10 | 214,03 | Хидравличен удар |

### 3.3. Програмни продукти НУАСГ и ИМХУАСГ

НУАСГ (Начални Условия за хидравличния удар в нАпорни Системи, малки и Големи) моделира стационарното течение в напорни тръбопроводни системи. Системата се представя като съвкупност от участъци, свързани в общи точки (възли). НУАСГ изчислява разпределението на дебитите, скоростите и налягането, и генерира съвместим входен файл за ИМХУАСГ [4, 5].

ИМХУАСГ (Интерактивно Моделиране на Хидравичен УдАр в напорни Системи, малки и Големи) симулира преходния процес по метода на характеристиките. Основният изходен резултат са обвивните линии на максималните и минималните напори, наложени върху надлъжния профил на тръбопровода – компактна графична характеристика на хидравличния удар в цялото трасе. Двете програми са авторски разработки [4, 5].

#### 3.3.1. Изчислителна схема

Изчислителната схема представлява 2 резервоара (горен и долен), свързани с тръбопровод, по дължината на който са разположени 9 спирателни крана. Котата на водното ниво на горния резервоар, в зависимост от разглеждания сценарий, кореспондира на кота водно ниво в енергогасителя под яз. Асеновец или на кота най-високо работно водно ниво на яз. Асеновец, а котата на водното ниво на долния резервоар е 361,00 и кореспондира на котата на водното ниво в утаителя на ПСПВ на гр. Сливен.

## 4. Дефиниране на експлоатационните сценарии

### 4.1. Обща структура на сценариите

Изследваните сценарии (табл. 3) са структурирани в два главни класа, продиктувани от различното хидравлично поведение на системата в различни фази от жизнения ѝ цикъл.

### 4.2. Сценарий А – нов тръбопровод

Стационарното моделиране с НУАСГ показва, че при напълно отворени всички спирателни кранове водното количество надвишава проектното $Q = 800$ l/s поради ниската грапавина на новите чугунени тръби ($\Delta = 0{,}1$ mm). Затова в началните години е необходимо дроселиране – поддържане на частично затворен спирателен кран. Моделирането показва необходима степен на отваряне 34 % при СК тип бътерфлай DN800

при ПСПВ. Затварянето при тези условия стартира от 34 % и ефективното работно време е само 53 s (34 % от 155 s) вместо 155 s. Това е ключов фактор, тъй като по-краткото време на затваряне генерира по-интензивен хидравличен удар.

Сценарий А.1 (нормална работа на енергогасителя при кота 384,88 m) включва случаи А.1.1–А.1.5. Сценарий А.2 (байпас на енергогасителя – извънредна ситуация, кота на началната точка на водопровода е максималното работно ниво на яз. Асеновец) включва случаи А.2.1, А.2.2.a, А.2.2.b и А.2.3. При всички случаи е изключително важно шибърните кранове в Шахта 4 да не се отварят напълно без последващо дроселиране: шибърните кранове са неподходящи за дроселиране поради неблагоприятната крива на загубите, а пълното им отваряне би предизвикало дебит значително над проектния и последващ интензивен нестационарен процес.

**Таблица 3. Систематизация на изследваните сценарии**

| Сценарий | Тип | Режим | Причина за хидравличен удар | Тип СК |
|---|---|---|---|---|
| А.1.1 | Нов | Нормална експлоатация | Дроселиране + затваряне на СК | Бътерфлай DN800, ПСПВ |
| А.1.2 | Нов | Нормална експлоатация | Затваряне на СК | Бътерфлай DN600, Шахта изп.1 |
| А.1.3 | Нов | Нормална експлоатация | Затваряне на СК | Шибър DN600, след река |
| А.1.4 | Нов | Нормална експлоатация | Затваряне на СК | Шибър DN600, Шахта 4 |
| А.1.5 | Нов | Нормална експлоатация | – | – |
| А.2.1 | Нов | Байпас на ЕГ | Затваряне на СК | Бътерфлай DN800, ПСПВ |
| А.2.2.a | Нов | Байпас на ЕГ | Затваряне на СК | Шибър DN600, ПСПВ |
| А.2.2.b | Нов | Байпас на ЕГ | Затваряне на СК | Бътерфлай DN800, ПСПВ |
| А.2.3 | Нов | Хидростатичен | – | – |
| Б.1.1 | Стар | Нормална експлоатация | Затваряне на СК | Бътерфлай DN800, ПСПВ |
| Б.1.2 | Стар | Нормална експлоатация | Затваряне на СК | Бътерфлай DN600, Шахта изп.1 |
| Б.2.1 | Стар | Байпас на ЕГ | Затваряне на СК | Бътерфлай DN800, ПСПВ |
| Б.2.2 | Стар | Байпас на ЕГ | Затваряне на СК | Бътерфлай DN600, Шахта изп.1 |

### 4.3. Сценарий Б – стар тръбопровод

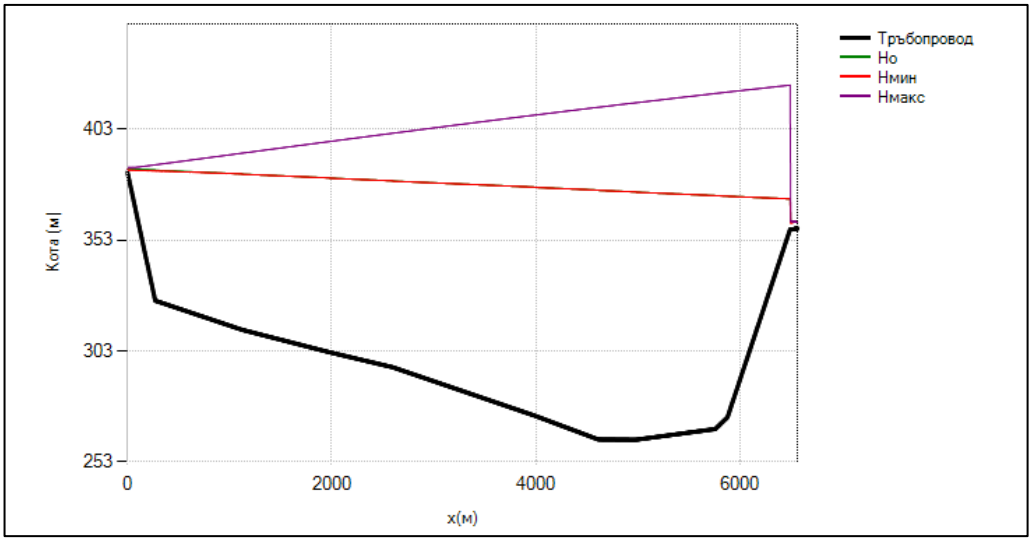
След години експлоатация грапавината нараства, пропускната способност намалява и необходимостта от дроселиране отпада. Всички затворни органи са напълно отворени при нормална работа, а ударното затваряне стартира от напълно отворено положение (пълни технически времена 152 – 270 s). Сценариите от група Б се оказват не определящи в сравнение с еквивалентните от А, поради което не са разгледани подробно.

## 5. Резултати от числено моделиране

Основният графичен резултат от ИМХУАСГ са обвивните линии на максималните и минималните напори, наложени върху надлъжния профил на тръбопровода. Вертикалното разстояние между обвивната линия и профила на тръбата в дадена точка дава максималното налягане при хидравличен удар в съответната точка – $H_{max}$; аналогично се получава за $H_{min}$. В допълнение за представителните сценарии са дадени таблици с $P_0$ (налягане при стационарен) и $P_{max}$ (максимално налягане при хидравличен удар) за всяка кранова шахта, респективно СК.

### 5.1. Сценарий А.1.1 – нормална работа, дроселиране при ПСПВ

Това е определящият и най-вероятен сценарий при ежедневна експлоатация. Дроселирането и затварянето се реализират от едни и същ СК (бътерфлай DN800 при ПСПВ), а ефективното време на затваряне е 53 s. Обвивните линии са показани на фиг. 2, а числените резултати – в табл. 4.




**Фиг. 2. Обвивни линии на максималните и минималните напори – Сценарий А.1.1 (нормална работа, дроселиране при ПСПВ)**

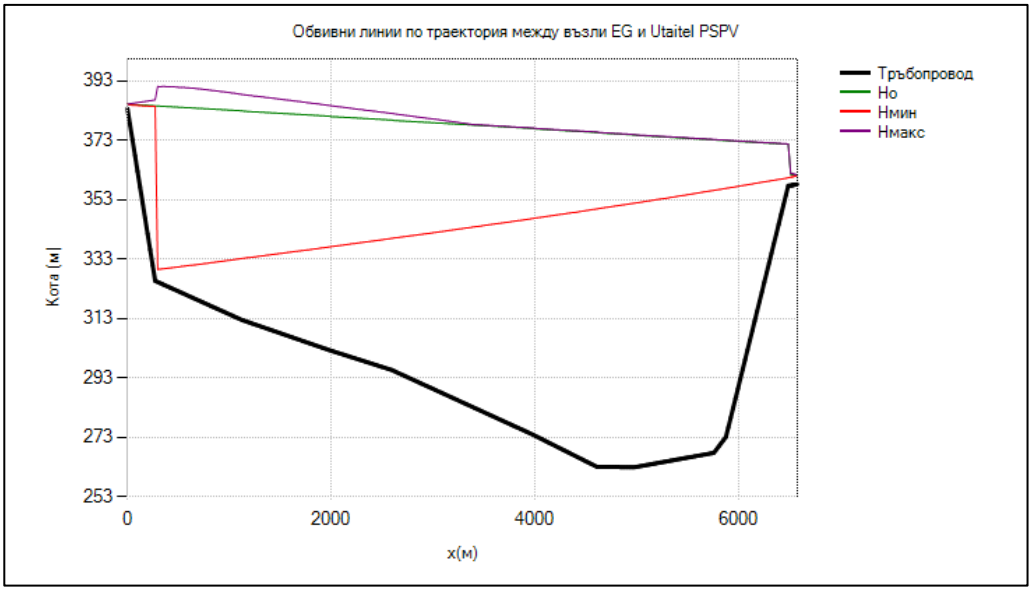
**Таблица 4. Налягания при нормална работа – Сценарий А.1.1**

| Кранова шахта | Метраж (m) | Кота ос тръба (m) | $P_0$ ($mH_2O$) | $P_{max}$ ($mH_2O$) |
|---|---|---|---|---|
| Кранова шахта 4 | 271,8 | 325,83 | 58,82 | 61,14 |
| Кранова шахта с изпускател 1 | 1125,9 | 312,69 | 70,21 | 79,30 |
| Кранова шахта с изпускател 2 | 1979,2 | 302,6 | 78,52 | 94,37 |
| Кранова шахта с изпускател 3 | 2598,4 | 295,84 | 83,94 | 104,66 |
| Кранова шахта с изпускател 4 | 3985,1 | 274,08 | 102,91 | 134,24 |
| Шахта пред Асеновска река | 4915,3 | 263,23 | 111,86 | 150,10 |
| Шахта след Асеновска река | 4988,9 | 263,12 | 111,57 | 150,43 |
| Шахта в т. 4993A.9 | 5761,9 | 267,96 | 105,10 | 149,49 |
| Шахта при ПСПВ | 6493,1 | 357,91 | 15,50 | 64,87 |

Максималното налягане 150,43 $mH_2O$ е значително под допустимото – 214,03 $mH_2O$, което означава, че системата е в безопасност при този сценарий.

## 5.2. Сценарий А.1.4 – затваряне на шибър в Шахта 4

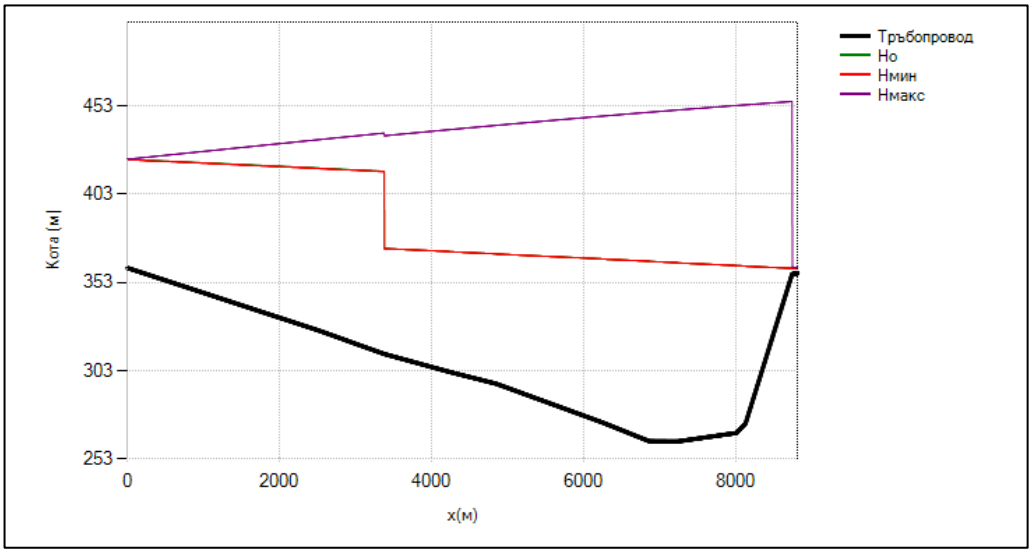
Сценарий А.1.4 изследва затварянето на шибър DN600 в началото на трасето (Шахта 4) при дроселиране по-надолу по течението. Затварянето в началния участък е неблагоприятно от гледна точка на минималните налягания. Обвивните линии (фиг. 3) показват значително подналягане при Шахта 4, но без достигане на вакуумни налягания.




**Фиг. 3. Обвивни линии – Сценарий А.1.4 (затваряне на шибър DN600 в Шахта 4, проверка за вакуум)**

## 5.3. Сценарий А.2.1 – байпас на енергогасителя, затваряне при ПСПВ

При байпас на енергогасителя началото на тръбопровода е яз. Асеновец с неговото работно водно ниво, което рязко увеличава работния напор. Обвивните линии (фиг. 4) показват значително по-голямо разстояние между $H_{max}$ и профила на тръбата. Числените резултати са дадени в табл. 5.




**Фиг. 4. Обвивни линии – Сценарий А.2.1 (байпас на енергогасителя, затваряне бътерфлай DN800 при ПСПВ)**

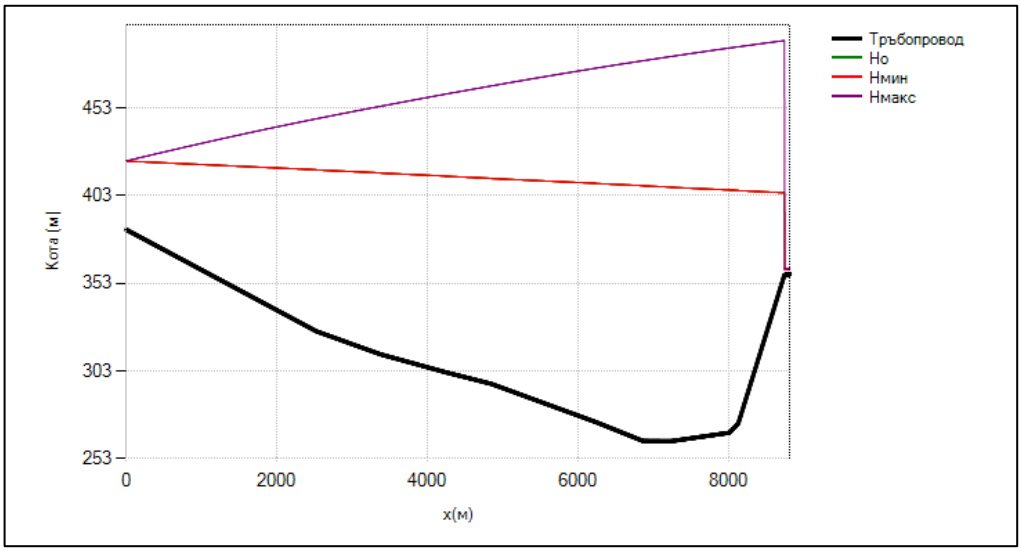
**Таблица 5. Налягания при байпас на ЕГ – Сценарий А.2.1**

| Кранова шахта | Метраж (m) | Кота ос тръба (m) | $P_0$ ($mH_2O$) | $P_{max}$ ($mH_2O$) |
|---|---|---|---|---|
| Кранова шахта 4 | 271,8 | 325,83 | 92,14 | 108,28 |
| Кранова шахта с изпускател 1 | 1125,9 | 312,69 | 74,35 | 124,14 |
| Кранова шахта с изпускател 2 | 1979,2 | 302,6 | 68,09 | 137,17 |
| Кранова шахта с изпускател 3 | 2598,4 | 295,84 | 73,55 | 146,38 |
| Кранова шахта с изпускател 4 | 3985,1 | 274,08 | 92,48 | 173,35 |
| Шахта пред Асеновска река | 4915,3 | 263,23 | 101,40 | 187,51 |
| Шахта след Асеновска река | 4988,9 | 263,12 | 101,12 | 187,71 |
| Шахта в т. 4993А.9 | 5761,9 | 267,96 | 94,66 | 185,36 |
| Шахта при ПСПВ | 6493,1 | 357,91 | 3,28 | 97,81 |

Максималните налягания достигат 187,71 $mH_2O$, което е под допустимото от 214,03 $mH_2O$.

## 5.4. Сценарий A.2.2.b – критичен сценарий

Сценарий A.2.2.b – байпас на енергогасителя и затваряне на СК бътерфлай DN800 при ПСПВ – генерира най-неблагоприятните налягания от всички изследвани сценарии. Обвивните линии (фиг. 5) показват ясно нарушаване на допустимото налягане в стоманения участък след Асеновска река. Числените резултати са дадени в табл. 6.




**Фиг. 5. Обвивни линии – критичен сценарий A.2.2.b (байпас на ЕГ, затваряне на СК бътерфлай DN800 при ПСПВ). Максималното налягане 219,43 mH₂O надвишава допустимото от 214,03 mH₂O за стоманения участък ø920/6**

**Таблица 6. Налягания при критичен сценарий A.2.2.b**

| Кранова шахта | Метраж (m) | Кота ос тръба (m) | $P_0$ (mH₂O) | $P_{max}$ (mH₂O) |
|---|---|---|---|---|
| Кранова шахта 4 | 271,8 | 325,83 | 92,13 | 121,22 |
| Кранова шахта с изпускател 1 | 1125,9 | 312,69 | 103,45 | 141,54 |
| Кранова шахта с изпускател 2 | 1979,2 | 302,6 | 111,76 | 158,48 |
| Кранова шахта с изпускател 3 | 2598,4 | 295,84 | 117,21 | 170,01 |
| Кранова шахта с изпускател 4 | 3985,1 | 274,08 | 136,15 | 201,89 |
| Шахта пред Асеновска река | 4915,3 | 263,23 | 145,06 | 219,00 |
| Шахта след Асеновска река | 4988,9 | 263,12 | 144,78 | 219,43 |
| Шахта в т. 4993A.9 | 5761,9 | 267,96 | 138,33 | 219,33 |
| Шахта при ПСПВ | 6493,1 | 357,91 | 18,28 | 133,78 |

Максималните налягания достигат 219,43 mH₂O, което е над допустимото от 214,03 mH₂O.

### 5.5. Обобщени резултати за максималните налягания по трасето

В табл. 7 са систематизирани максималните стойности на налягането във всички възлови точки на водопровода, регистрирани при различните симулационни сценарии. Резултатите са необходими за избор на номинално налягане на арматурите и фасонните части в съответните шахти.

**Таблица 7. Обобщени максимални налягания от всички сценарии**

| Кранова шахта | Метраж (m) | Кота ос тръба (m) | $P_0$ ($mH_2O$) | $P_{max}$ ($mH_2O$) |
|---|---|---|---|---|
| Кранова шахта 4 | 271,8 | 325,83 | 54,28 | 63,07 |
| Кранова шахта с изпускател 1 | 1125,9 | 312,69 | 67,37 | 83,45 |
| Кранова шахта с изпускател 2 | 1979,2 | 302,6 | 96,67 | 121,22 |
| Кранова шахта с изпускател 3 | 2598,4 | 295,84 | 109,81 | 141,54 |
| Кранова шахта с изпускател 4 | 3985,1 | 274,08 | 119,90 | 158,48 |
| Шахта пред Асеновска река | 4915,3 | 263,23 | 126,66 | 170,01 |
| Шахта след Асеновска река | 4988,9 | 263,12 | 148,42 | 201,89 |
| Шахта в т. 4993A.9 | 5761,9 | 267,96 | 159,27 | 219,00 |
| Шахта при ПСПВ | 6493,1 | 357,91 | 159,38 | 219,43 |

## 6. Дискусия и оценка на риска

### 6.1. Нормален експлоатационен режим

Резултатите от проведените симулации показват, че при нормална експлоатация на енергогасителя максималните регистрирани налягания (достигащи 150,43 $mH_2O$ при Сценарий A.1.1) остават значително под допустимото натоварване от 214,03 $mH_2O$ за съществуващите стоманени участъци, както и под номиналното налягане на новопроектираните тръби от сферографитен чугун DN800 (PN16 ≈ 163 $mH_2O$). Сценариите от Група Б (изследващи стария тръбопровод) генерират сходни или по-ниски стойности на налягането и следователно не са меродавни за оценката на риска. Хидростатичните натоварвания при работа на системата в режим на байпас (без наличие на течение – Сценарий A.2.3, с максимум от 159,38 $mH_2O$) също са в рамките на нормативните допуски. Въз основа на тези данни може да се заключи, че критични натоварвания, застрашаващи целостта на инфраструктурата, възникват единствено при суперпозицията на следните фактори: работа в режим на байпас, налично активно течение и хидравличен удар вследствие на аварийно затваряне на арматурата.

### 6.2. Критичен сценарий A.2.2.b

При анализа на Сценарий A.2.2.b се установява генериране на максимално налягане от 219,43 $mH_2O$, което надвишава проектно допустимата стойност от 214,03 $mH_2O$ с

5,40 m (≈ 2,5%). Независимо от относително ниския процент на това превишение рискът за структурната цялост на съоръжението следва да бъде класифициран като значителен поради следните три ключови фактора:

1. Редукция на дебелината на тръбната стена вследствие на корозия: Референтното допустимо налягане е определено на базата на проектна (ненамалена) дебелина от 6 mm. При хипотетична редукция на стената с едва 1 mm (до ефективна дебелина 5 mm), дължаща се на експлоатационни корозионни процеси, изчисленото допустимо налягане се понижава до приблизително 178 $mH_2O$. В този случай превишението на работното налягане би нараснало до 41 $mH_2O$, което представлява критично отклонение от 20 % спрямо нормите.

2. Умора на материала: Продължителната експозиция на циклични хидравлични натоварвания в рамките на няколко десетилетия създава съществени предпоставки за умора на метала. Този деградационен процес се ускорява и мултиплицира при наличието на концентратори на напрежение, като зони с локална корозия, механични деформации (вдлъбнатини) по профила или участъци с компрометирано качество на заваръчните съединения.

3. Неопределеност на актуалното техническо състояние: Достъпните входящи данни за изследваните стоманени тръбопроводи (⌀920/6) се ограничават до техния номинален диаметър и проектна дебелина към момента на изграждане. В този контекст изчисленото допустимо налягане представлява изцяло теоретична величина, чието безкритично прилагане като абсолютен критерий за експлоатационна безопасност е необосновано и може да доведе до погрешна оценка на действителната надеждност на системата.

### 6.3. Оперативен риск – човешки фактор

Допълнителен рисков фактор представлява потенциалното пълно отваряне на шибърния кран в Шахта 4 при липса на дроселиране в участъка след него. При подобен сценарий дебитът би надхвърлил проектните стойности, а последващо затваряне на арматурата с цел регулиране създава предпоставки за възникване на неконтролируем преходен процес. С оглед на предотвратяването на подобни ситуации, разработването и стриктното спазване на детайлен експлоатационен регламент от обслужващия персонал се явява критично условие за безопасната работа на системата.

## 7. Заключения и препоръки

Проведеното числено моделиране чрез софтуерните пакети НУАСГ и ИМХУАСГ, обхващащо над 10 експлоатационни и аварийни сценария, позволява формулирането на следните основни изводи:

1. **Безопасност при нормален експлоатационен режим.** Максималните регистрирани налягания (до 150,43 $mH_2O$) остават значително под допустимите якостни граници за всички тръбни участъци в системата. При

нормална работа на енергогасителя рискът от компрометиране на тръбопровода е минимален.

2. **Критичност на режима с байпасиране на енергогасителя.** Симулираният Сценарий A.2.2.b генерира свръхналягане от 219,43 $mH_2O$, което надвишава теоретично допустимото натоварване от 214,03 $mH_2O$ за съществуващите стоманени участъци. Действителният риск е потенциално по-висок предвид очакваното редуциране на дебелината на тръбната стена вследствие на дългогодишни корозионни процеси.

3. **Адекватност на времената за затваряне на арматурите**. Проектно заложените времена за затваряне на спирателните кранове в диапазона 152 – 270 s са оптимално подбрани и гарантират плавен преходен процес при нормални условия.

4. **Специфики на хидравличното регулиране**. Необходимостта от дроселиране в началния период на експлоатация (поради ниската грапавина на новопроектираните тръби) изисква строг експлоатационен протокол. Шибърните кранове не са конструктивно предназначени за дроселиране и пълното им отваряне без адекватна последваща регулация на потока трябва да се избягва.

## 7.1. Практически препоръки:

**Препоръка 1:** Въвеждане на категорична забрана за байпасиране на енергогасителя по време на нормална експлоатация. В случаите на техническа неизбежност от използване на байпасната връзка операциите трябва да се извършват по специално разработен протокол за бавно и контролирано изолиране на участъците.

**Препоръка 2:** Извършване на задължителен ултразвуков безразрушителен контрол (дефектоскопия) на съществуващите стоманени тръби (ø920/6) по време на строително-монтажните работи (СМР). Необходимо е локализиране на поне 5 – 10 представителни точки за измерване на остатъчната дебелина на стената, последвано от преизчисляване на действителните допустими налягания.

**Препоръка 3:** Анализиране на технико-икономическата целесъобразност за пълна подмяна или безизкопна рехабилитация (релайнинг) на критичния стоманен участък с дължина около 764 m. При констатиране на силно редуцирана дебелина на стената, подмяната на участъка е напълно инженерно обоснована като единствената мярка, категорично елиминираща риска от авария.

**Препоръка 4:** Съставяне и внедряване на детайлен експлоатационен регламент (оперативно ръководство) за управление на спирателната арматура от страна на обслужващия персонал. Документът трябва да включва изрична забрана за използване на шибърни кранове с цел дроселиране, както и да дефинира точната последователност от действия при маневриране в аварийни и извънредни ситуации.

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

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

6. *Tzatchkov, V., Tzankov, B.* Modelirane i analiz na protichane na hidravlichen udar v glaven dovezhdasht vodoprovod ot yazovir Asenovets do PSPV na gr. Sliven – Okonchatelen doklad Alve consult EOOD. 2025.


# WATER HAMMER MODELLING IN HETEROGENEOUS PIPELINES – ANALYSIS OF CRITICAL LOADING ON EXISTING INFRASTRUCTURE


**B. Tzankov**[1]



***Keywords:*** *water hammer, heterogeneous pipelines, ductile iron pipes, steel pipes, risk assessment, numerical modelling, NUACEG, IMHUACEG*



## ABSTRACT

This paper addresses the engineering challenge associated with the safety assessment during the phased rehabilitation of existing water supply systems. The subject of this study is a 9084 m long hybrid main transmission water pipeline, where newly designed ductile iron sections (DN800) are integrated with over 50-year-old steel pipes (ø920/6) and legacy cast iron pipes (ø800) installed in the 1970s. Using the NUASG and IMHUASG software, numerical modelling of water hammer was conducted across more than 10 normal and emergency scenarios. The simulations account for the different wave celerities of the materials (1054 m/s for cast iron, 908 m/s for steel) and the necessity for throttling due to the low surface roughness of the new pipes. The results demonstrate that under normal operation, thanks to the energy dissipator, the system remains safe, with maximum pressures not exceeding 150 m$H_2O$ (meters of water column). However, bypassing the energy dissipator (ED) combined with the rapid closure of the DN800 butterfly valve at the Drinking Water Treatment Plant (DWTP) generates surge pressures of up to 219,43 m$H_2O$, which exceeds the theoretically allowable limit of 214,03 m$H_2O$ for the ø920/6 steel pipes. The study substantiates the necessity for mandatory ultrasonic non-destructive testing (NDT) of the legacy pipeline sections before their commissioning.



[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