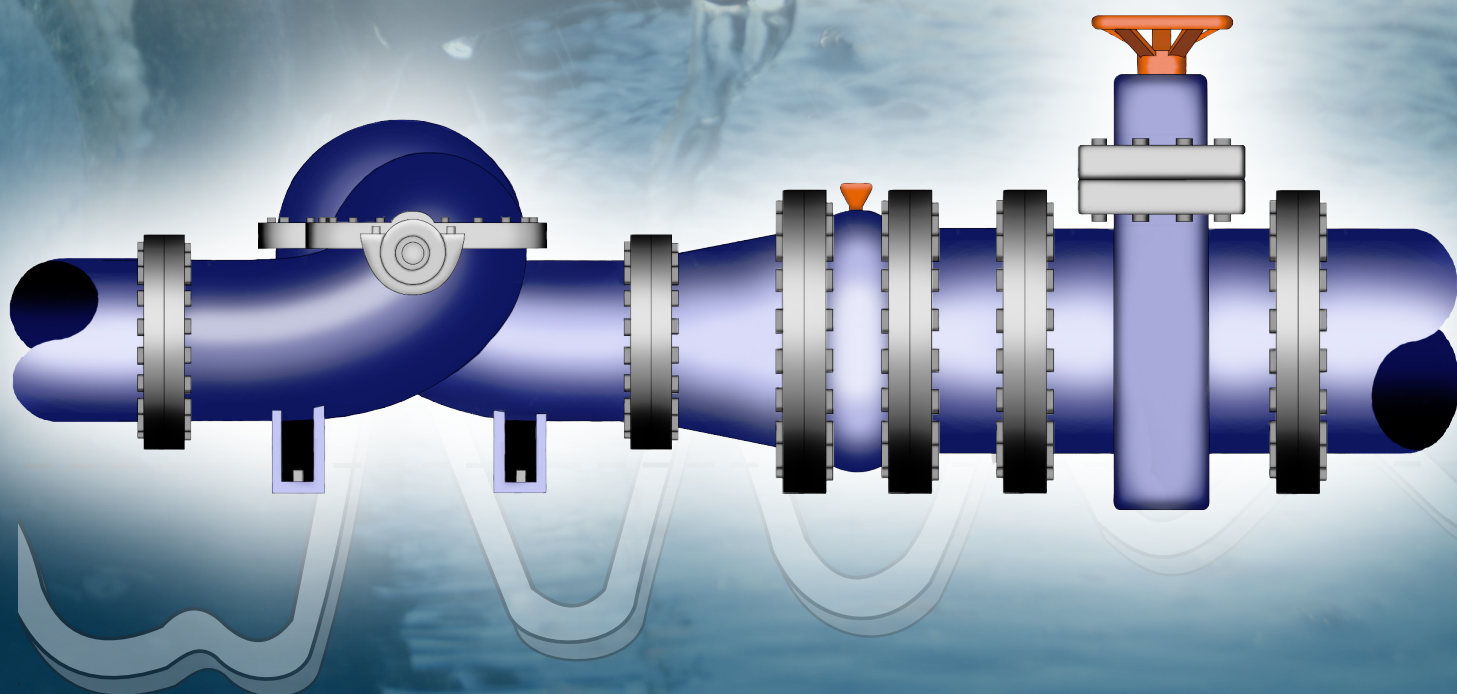


ПРОФ. Д-Р ИНЖ. ВЕЛИЧКО ЦАЧКОВ

ДОЦ. Д-Р ИНЖ. БОРИС ЦАНКОВ

ХИДРАВЛИЧЕН УДАР В НАПОРНИ СИСТЕМИ: АНАЛИЗ, МОДЕЛИРАНЕ И ЗАЩИТА

**Ръководство за разбиране, изследване и овладяване
на хидравличния удар в съвременен подход,
с помощта на инженерни средства и компютърно моделиране**



Всички права над тази книга са запазени.

Възпроизвеждането на цялата книга или на част от нея под каквато и да е форма е забранено без писменото съгласие на авторите.

ХИДРАВЛИЧЕН УДАР В НАПОРНИ СИСТЕМИ: АНАЛИЗ, МОДЕЛИРАНЕ И ЗАЩИТА

© Copyright 2025

© ПРОФ. Д-Р ИНЖ. ВЕЛИЧКО ЦАЧКОВ, автор и издател

© ДОЦ. Д-Р ИНЖ. БОРИС ЦАНКОВ, автор и издател

© доц. д-р инж. Петър Филков, рецензент

© гл. ас. д-р инж. Станислав Дарачев, рецензент

© Михаела Дилова, художник илюстрация

© Ди Джи Ай Дизайн ЕООД, графичен дизайн, предпечат и печат

Спонсор: ПАЙП ТЕХНИК ООД

ISBN 978-619-04-0610-5

Анотация

Хидравличният удар е едно от най-критичните и често подценявани явления в експлоатацията на напорни тръбопроводи. Неговите ефекти – внезапни промени в налягането, вакуум, разрушаване на съоръжения и умора на материала – могат да доведат до сериозни щети, ако не бъдат правилно анализирани и контролирани.

Настоящата книга предлага **цялостен инженерен подход** към изследването и овладяването на хидравличния удар. Съчетавайки **физическо разбиране на явлениято, систематичен анализ и съвременно компютърно моделиране**, авторите представят ясно и практично знание, подплатено с реални примери, множество фигури, алгоритми и специално разработен **български софтуер за симулация**.

В книгата ще откриете:

- подробно описание на преходните режими в различни типове хидравлични системи, като **тласкателни тръбопроводи, ВЕЦ, напоителни мрежи**, и др.;
- преглед на съществуващите **противоударни съоръжения и арматури**;
- **методика за проектиране** на защита срещу хидравличен удар;
- наръчник във **въпроси и отговори** относно хидравличния удар;
- **практически примери** и резултати от реални инженерни проекти.

Подходяща както за инженери-проектанти и специалисти от експлоатацията, така и за преподаватели, студенти и изследователи в областта на хидравликата.

Съдържание

ПОСВЕЩЕНИЕ	9
БЛАГОДАРНОСТИ	11
УВОД	13
ЧАСТ ПЪРВА: ОПИСАНИЕ НА ЯВЛЕНИЕТО В РАЗЛИЧНИ ХИДРАВЛИЧНИ СИСТЕМИ.....	15
1.1 Основни положения за разбиране на явлението	15
1.1.1. Видове преходни процеси в напорни системи.....	15
1.1.2. Скорост на разпространение на ударната вълна.....	16
1.1.3. Формула на Жуковски	19
1.1.4. Трансформация и отражение на ударните вълни	20
1.1.5. Кавитационно разкъсване на водната струя	23
1.2 Протичане на хидравличния удар в различни напорни системи	26
1.2.1. Хидравличен удар в помпени напорни тръбопроводи.....	26
1.2.1.1. Случаи без разкъсване на водната струя.....	27
1.2.1.2. Случаи с разкъсване на водната струя.....	31
1.2.1.3. Помпени станции с дълъг довеждащ тръбопровод	34
1.2.2. Хидравличен удар в гравитачни напорни тръбопроводи.....	36
1.2.2.1. Затваряне на затворен орган в края на тръбопровода.....	36
1.2.2.2. Отваряне на затворен орган в края на тръбопровода	37
1.2.3. Хидравличен удар в напорни тръбопроводи на ВЕЦ	38
1.2.4. Хидравличен удар в разклонени напорни мрежи за напояване.....	51
1.2.5. Сведения за хидравличен удар в хвостопроводи и тръбопроводи за отпадъчни води.....	60
ЧАСТ ВТОРА: СЪОРЪЖЕНИЯ И СРЕДСТВА ЗА ЗАЩИТА СРЕЩУ ХИДРАВЛИЧНИЯ УДАР.....	63
2.1 Проблеми, свързани с хидравличния удар.....	63
2.1.1. Недопустими свръхналягания.....	63
2.1.2. Недопустими вакуумни налягания	63
2.1.3. Недопустими свръх обороти на помпи и турбини	64
2.1.4. Умора на материала на тръби и арматури	65
2.2 Принципи положения на защитата срещу хидравличен удар.....	66
2.3 Основни методи и средства за защитата срещу хидравличния удар	67
2.3.1. Водна кула	67
2.3.2. Открит резервоар за впускане на вода	69
2.3.3. Затворен резервоар за впускане на вода	71
2.3.4. Виндкесел (хидрофор)	73
2.3.5. Разлика между противоударен виндкесел (хидрофор) и виндкесел (хидрофор) за регулиране на налягане	76
2.3.6. Обратна клапа по тръбопровода.....	77
2.3.7. Удароубивател	81
2.3.8. Ударогасител	83
2.3.9. Въздушници.....	83
2.3.9.1. Впускане и изпускане на въздух.....	85
2.3.9.2. Впускане и задържане на въздух	85
2.3.10. Разрушими дискове.....	87
2.3.11. Добавяне на маховик към вала на помпения агрегат.....	88
2.3.12. Изпускане на вода в обратна посока през помпите	89
2.3.13. Байпасиране на помпите	91

ЧАСТ ТРЕТА: УКАЗАНИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХИДРАВЛИЧНИЯ УДАР И	
ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ПРОТИВОУДАРНИТЕ СРЕДСТВА.....	93
3.1 Обща процедура	93
3.2 Критерии за издръжливост	94
3.2.1. Издръжливост на свръхналягане	94
3.2.2. Издръжливост на отрицателно налягане (на вакуум)	95
3.2.2.1. Идеално кръгла тръба без противокорозионни покрития	95
3.2.2.2. Идеално кръгла тръба, с външно и вътрешно циментово антикорозионно покритие.....	98
3.2.2.3. Не идеално кръгла тръба (тръба с елиптичност)	98
3.2.3. Издръжливост на превишаване (свръхобороти) на хидравличните машини	101
3.2.4. Обобщение на критериите за издръжливост	101
3.3 Обвивни линии на максималните и минималните напори при хидравличен удар	101
3.4 Противоударна защита на помпени напорни тръбопроводи	103
3.4.1. Най-неблагоприятни експлоатационни условия по отношение на хидравличния удар.....	103
3.4.2. Процедура за проектиране.....	104
3.4.3. Случаи без разкъсване на водната струя	105
3.4.3.1 Защита с помощта на обходна тръба (байпас).....	105
3.4.3.2. Изпускане на вода в обратна посока през програмируеми затворни органи	107
3.4.3.3. Използване на ударорубиватели.....	108
3.4.3.4. Увеличаване на инерцията на помпените агрегати.....	111
3.4.3.5. Обобщение на формите на защита в случая без разкъсване на водната струя	113
3.4.4. Случаи с разкъсване на водната струя.....	114
3.4.4.1. Защита чрез виндкесел	115
3.4.4.2. Защита с водна кула	121
3.4.4.3. Защита с резервоари за впускане на вода.....	122
3.4.4.4. Избор измежду водна кула, виндкесел или резервоар за впускане на вода.....	125
3.4.4.5. Използване на въздушници	125
3.4.4.6. Обобщение на формите за защита в случай на вакуум в тръбопровода	126
3.5 Противоударна защита на гравитачни напорни тръбопроводи	127
3.5.1. Най-неблагоприятни условия на работа.....	127
3.5.2. Процедура за проектиране.....	128
3.6 Противоударна защита на напорни тръбопроводи на ВЕЦ.....	129
3.7 Противоударна защита на напорни мрежи за напояване	133
ЧАСТ ЧЕТВЪРТА: СОФТУЕР НА БЪЛГАРСКИ ЕЗИК ЗА ИНТЕРАКТИВНО	
МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРАВЛИЧНИЯ УДАР.....	139
4.1. Моделиране на началните условия	141
4.1.1. Общи положения.....	141
4.1.2. Програма НУАСГ (Начални Условия за хидравличния удар в напорни Системи, малки и Големи).....	142
4.2. Моделиране на хидравличния удар	149
4.2.1. Общи положения.....	149
4.2.2. Програма ИМХУАСГ (Интерактивно Моделиране на Хидравличен Удар в напорни Системи, малки и Големи)	151
4.2.3. Препоръчителна процедура за извършване на едно изследване на хидравличен удар	164

ЧАСТ ПЕТА: СПРАВОЧНИК ПО ХИДРАВЛИЧЕН УДАР	167
5.1. Планиране и проектиране	167
5.1.1. Помпени тръбопроводи.....	167
5.1.2. Гравитачни тръбопроводи	182
5.2. Проблеми в експлоатацията, произтичащи от хидравличен удар	188
5.2.1. Помпени напорни тръбопроводи.....	188
5.2.2. Гравитачен тръбопровод.....	192
5.2.3. Елементарни, но важни условия, които трябва да се спазват при експлоатацията.....	195
ЧАСТ ШЕСТА: ПРИМЕРИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРАВЛИЧЕН УДАР.....	197
6.1 ПРИМЕР 1. Определяне на началните условия за изследване на хидравличен удар в помпен напорен тръбопровод.	197
6.2 ПРИМЕР 2. Моделиране на хидравличния удар в помпения тръбопровод от ПРИМЕР 1	201
6.2.1. ПРИМЕР 2а. Моделиране на хидравличния удар в помпения тръбопровод от ПРИМЕР 1 без защитни средства и без въздушници	201
6.2.2. ПРИМЕР 2б. Моделиране на хидравличния удар в помпения тръбопровод от ПРИМЕР 1 с въздушници за впускане и изпускане на въздух	202
6.2.3. ПРИМЕР 2в. Моделиране на хидравличния удар в помпения тръбопровод от ПРИМЕР 1 с въздушници за впускане и задържане на въздух.....	204
6.2.4. ПРИМЕР 2г. Моделиране на хидравличния удар в помпения тръбопровод от ПРИМЕР 1 с виндкесел	205
6.3 ПРИМЕР 3. Начални условия за хидравличен удар в напорна мрежа за напояване	206
6.4 ПРИМЕР 4. Хидравличен удар в напорна мрежа за напояване	209
6.4.1. ПРИМЕР 4а. Спиране на помпите	210
6.4.2. ПРИМЕР 4б. Затваряне на крайния дъждовален апарат DA2.....	211
6.5 ПРИМЕР 5. Начални условия за хидравличен удар в тръбопроводи на ВЕЦ	212
6.6 ПРИМЕР 6. Хидравличен удар в тръбопровод на ВЕЦ.....	216
6.7 Пример на проектиране на напорен тръбопровод на помпена станция с използване на НУАСГ и ИМХУАСГ.....	220
6.7.1. Обща процедура	221
6.7.2. Якостни характеристики	222
6.7.2.1. Издръжливост на свръхналягане.....	222
6.7.2.2. Издръжливост на отрицателно налягане.....	223
6.7.2.3. Издръжливост на въздушници и други арматури	223
6.7.3. Представяне на тръбопроводната система в моделирането	223
6.7.4. Моделиране на стационарното течение (начални условия за хидравличния удар)	223
6.7.5. Моделиране на хидравличния удар.....	226
6.7.5.1. Махов момент на агрегата помпа-двигател	226
6.7.5.2. Скорост на разпространение на ударната вълна	226
6.7.5.3. Моделиране на случая без защитни средства.....	226
6.7.6. Алтернативи на защита срещу хидравличния удар.....	227
6.7.6.1. Виндкесел при помпената станция	227
6.7.6.2. Други изследвани алтернативи на защита.....	231
6.7.7. Закljučения от резултатите от моделирането на хидравличния удар.....	231
6.8 Често срещани проектантски грешки по отношение на хидравличния удар	232
ЛИТЕРАТУРА.....	237
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	239

Посвещение



Посвещаваме тази монография на човека, който не само ни научи да разбираме хидравликата, но и да обичаме науката – проф. дтн инж. Емил Маринов.

Пионер на изчислителната хидравлика в България, новатор с прозорливо инженерно мислене и вдъхновяващ преподавател, който с отдаденост и страст остави незаличима следа в поколения хидроинженери.

Той не просто ни даде знания – той ни запали.

С мисълта за него пишем тези страници – с благодарност, с преклонение, с обич.

От неговите ученици и последователи – Авторите

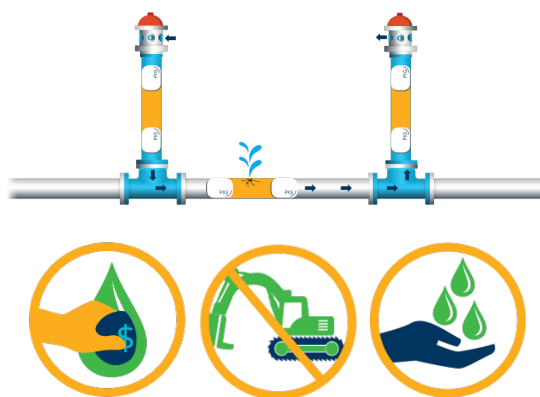
Септември 2025 г., София

Благодарности



Авторите изразяват своята дълбока признателност към фирма „Пайп техник“ ООД за пълното финансиране на издаването на настоящата монография, както и за нейния принос към развитието и популяризирането на инженерната наука в областта на водите.

Дейността на „Пайп техник“ ООД е насочена към инженерингови дейности по изключително важния за България въпрос на намаляване на загубите на вода във ВиК системите, главно чрез отстраняване на течове във водоснабдителни тръбопроводи и сградни отклонения, основан на новата израелска технология CuraPipe. Технологията е безизкопна, елиминира течовете чрез запущване отвътре и не изисква прекъсване на водоснабдяването, много по-икономична в сравнение с традиционните методи на ремонт или замяна на тръбопроводи.



Сърдечна благодарност отправяме и към рецензентите на изданието.

На **доц. д-р инж. Петър Филков** благодарим за задълбочения и детайлен анализ, както и за ценните препоръки относно терминологията, прецизирането на текста и фигурите.

На **гл. ас. д-р инж. Станислав Дарачев** благодарим за полезните насоки и препоръки относно съдържанието на текста, графичното му оформление и представянето на включените изчислителни примери.

Техният принос допринесе съществено за повишаването на качеството и яснотата на настоящото издание.

Увод

В съответствие със своето предназначение, напорните тръбопроводи се проектират и експлоатират за условия на непроменящо се (стационарно) течение. В експлоатацията им, обаче са неизбежни процеси на преход от едно стационарно течение към друго. Поне веднъж в началото, за да се въведе в експлоатация, тръбопроводът трябва да се напълни с вода, а понякога трябва да се изпразни и напълни отново. Всеки пуск или спиране на помпите, както и всяко затваряне на кранове, причинява преходен режим, по време на който се променят хидравличните параметри (скорост и налягане) във всяка точка от тръбопровода. При това, спирането на помпите може да е програмирано и контролирано (когато се извършва умишлено) или случайно и неконтролирано (когато се прекъсва електрозахранването на помпените двигатели). Този, последен случай, се оказва критичен по отношение на получаваните налягания и може да възникне във всеки момент и във всеки тласкателен тръбопровод¹.

Преходните режими в хидравличните системи имат различна продължителност. Докато пълненето с вода и изпразването на тръбопровода са бавни и отнемат от часове до дни, преходният период след спиране или пуск на помпите, като и при затваряне или отваряне на спирателни кранове, продължава само няколко секунди или минути. Въпреки че е краткотраен, по време на протичането му, могат да се получат много значителни промени в налягането, които в някои случаи могат да доведат до разрушаване на тръби, поради високо налягане, или до тяхното смачкване поради вакуум вътре в тях. Познати са много случаи в практиката, в които са възникнали подобни проблеми. Всичко това е породило наименованието **хидравличен удар**, което е синоним на бърз хидравличен преходен процес в напорни системи.

В други случаи тръбите не се разрушават веднага, но често повтарящи се значителни хидравлични удари могат да съкратят техния живот, поради явлението **умора на материала**.

За да се гарантира безопасността на хидравличната система, е необходимо да се анализират преходните процеси, които могат да възникнат в нея, да се определи дали има някаква опасност, произтичаща от техните ефекти, и да се предприемат мерки за защита, ако се окажат необходими. Мерките, най-общо могат да бъдат следните:

- а) да се използват тръби и арматури от по-висок клас, които могат лесно да издържат наляганята (положителни и отрицателни), които възникват при преходните процеси;
- б) да се направят по-плавни преходните процеси, например помпите да спират не толкова бързо или крановете да се затварят по-бавно;
- в) да се предвидят и проектират специални противоударни средства (защита срещу хидравличния удар), които намаляват отрицателните ефекти на преходните процесите в желаните граници.

¹ Наричан напорен тръбопровод в хидромелиорациите и в хидротехниката. В монографията се използват и двата термина.

В болшинството случаи алтернатива (в) се оказва най-подходяща, от икономическа и техническа гледна точка. Проектантът на хидравличната система трябва да познава преходните процеси, които могат да възникнат, за да знае кои са възможните противоударни съоръжения и да може да анализира какво би станало, ако се приложат едни или други от тях, с цел да определи най-подходящото. Има публикувани книги, занимаващи се с хидравличния удар, както в България, така и в чужбина, но те най-вече се концентрират върху теоретичната и математическата част на проблема, представяйки диференциалните уравнения, които описват явлението и различни методи за математическото им решение в частни случаи, въз основа на сложни аналитични и графически процедури, или специални числени методи.

Подходът на тази монография е различен. Днес съществуват удобни за потребителя ефективни компютърни програми, които позволяват да се моделира хидравличния удар и които могат да бъдат използвани от инженери-проектанти без да са специалисти в математическото моделиране и числените методи. Това, което е нужно сега на проектанта, е първо да разбере физическата същност на хидравличния удар и средствата за защита срещу него и да разполага с една систематична процедура за анализ на възможните преходни процеси и тяхното контролиране във всеки отделен случай. В тази връзка монографията има претенции да обясни по прост и нематематичен начин какво представлява хидравличният удар, как протича в различни напорни системи, какви са средствата, които могат да се използват, за да се контролира, и предлага систематични процедури, които могат да се използват за анализирането му и проектиране на съответните противоударни съоръжения. Представа, също така информация за компютърна програма на български език за интерактивно моделиране на хидравличния удар.

В съответствие с това, монографията е разделена на шест части. В първата част се описва как протича хидравличния удар в различни напорни системи, във втората - кои са и как действат възможните съоръжения и средства за защита срещу него. В третата част се дават указания за изследване на хидравличния удар в различни системи и оразмеряване на съответните противоударни средства. В четвъртата част се представя информация за компютърната програма на български език за интерактивно моделиране на хидравличния удар. Петата част представлява един вид справочник по хидравличен удар, където по сбит начин, във вид на преки въпроси и конкретни отговори, се обясняват основните проблеми и решения, свързани с хидравличния удар в етапите на планиране, проектиране и експлоатация. Накрая, в шестата част, се представят примери на приложение, взети от реални проекти.



Проф. д-р инж. ВЕЛИЧКО ЦАЧКОВ

Възпитаник на хидротехническия факултет на УАСГ, работил в България като научен сътрудник в бившия Институт по Хидротехника и Мелиорации и в УАСГ. От 1984 г. работи в Латинска Америка, в настоящия момент професор в Мексиканския Институт по Технологии на Водите (IMTA). Автор на компютърни програми, 17 книги на испански език и над 250 научни публикации в списания и международни конференции. Член на Мексиканската национална система на научните работници (Sistema Nacional de Investigadores) и на Мексиканската инженерна академия (Academia Nacional de Ingeniería). Носител на 6 награди за най-добри научни публикации, измежду които Best Theoretical Paper for Journal of Water Resources Planning and Management 2002, American Society of Civil Engineers; Best Paper at the 10th International Water Distribution System Analysis Conference, Kruger National Park, South Africa, и други 4 в Мексико. Настоящата книга е написана по време на саботичната му година (2024–2025) в хидротехническия факултет на УАСГ.



Доц. д-р инж. БОРИС ЦАНКОВ

Преподавател в катедра „Хидравлика и хидрология“ към УАСГ, където води лекции по Хидравлика и Хидромеханика. Бил е заместник-декан на Хидротехническия факултет и заместник-ректор на УАСГ, а в момента е председател на Общото събрание на университета. Член е на УС на Българска асоциация по водите. Ръководил е редица значими инфраструктурни проекти в областта на инженерната ВиК инфраструктура. Участник е в поредица Национални антарктически експедиции с отговорности по обновяване на инженерната ВиК инфраструктура на Българската полярна база „Св. Климент Охридски“. Настоящото издание е резултат от съвместната му работа с проф. д-р инж. Величко Цачков по темата за хидравличния удар – област, в която ги свързва дългогодишен професионален интерес и експертен опит.

Хидравличният удар е ключово явление при експлоатацията на напорни системи, което може да доведе до сериозни повреди и оперативни рискове, ако не се извърши необходимата оценка и не се предвидят подходящи защитни средства. Тази книга предлага практическо ръководство за неговия **анализ, моделиране и овладяване**, с помощта на достъпни методи и **специализиран софтуер на български език**.

Авторите представят ясно физическата същност на процесите, възможностите за защита и систематична процедура за инженерно проектиране. Изданието е предназначено за **проектанти, експлоатационни специалисти, преподаватели и студенти** в сферата на хидравликата и водоснабдителните, хидротехническите и хидромелиоративните системи.

С любезното съдействие на:



99 лева / 49 euro