

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСТАЦИОНАРНИТЕ ПРОЦЕСИ**  
**В ДЕРИВАЦИОННИЯ КАНАЛ НА МВЕЦ "КУНИНО"**

Владимир Кукурин<sup>1</sup>, Николай Лисев<sup>2</sup>, Сава Тачев<sup>3</sup>, Петър Тодоров<sup>4</sup>

**STUDY OF HYDRAULIC TRANSIENTS IN THE HEADRACE CANAL**  
**OF HPP "KUNINO"**

Vladimir Kukurin<sup>1</sup>, Nikolay Lisev<sup>2</sup>, Sava Tachev<sup>3</sup>, Peter Todorov<sup>4</sup>

**РЕЗЮМЕ**

В настоящата разработка е представено изследване на нестационарните процеси, протичащи в деривационния канал на ВЕЦ при аварийно отпадане на товара и бързо ограничаване на достъпа на вода към агрегатите.

Направен е кратък обзор на хидравличната същност на проблема и са представени някои методи за изследването му.

За изследване на формиращите се в канала вълни е създаден числен хидравличен модел. Представени са някои от основните моменти от самото създаване, както и получените резултати. Изследвани са различни сценарии за опериране на затворните органи, като е подбран най-подходящият с оглед максимално бързо възстановяване на нормалната експлоатация на централата.

**SUMMARY**

In the present article a study of the hydraulic transients occurring in the headrace channel of an HPP as a result of a sudden drop out of the load and rapid water supply shut off is presented.

An overview of the existing literature data regarding the essence of the hydraulic phenomena as well as some practical methods for their solving are considered.

The wave propagation along the channel is investigated based on a numerical model. The main topics concerning the model preparation, the computational process and some of the results are presented. Several scenarios for control gates operation are investigated among which the most adequate one, with respect to the time required for normal operation re-establishment, is selected.

---

<sup>1</sup> Владимир Кукурин, инж., УАСГ, Катедра "Хидравлика и Хидрология", 1046 София, бул. "Христо Смирненски" 1, e-mail: [v.kukurin@gmail.com](mailto:v.kukurin@gmail.com).

<sup>2</sup> Николай Лисев, доц. д-р инж., УАСГ, Катедра "Хидравлика и Хидрология", 1046 София, бул. "Христо Смирненски" 1, e-mail: [lisev\\_fhe@uacg.acad.bg](mailto:lisev_fhe@uacg.acad.bg).

<sup>3</sup> Сава Тачев, ас. д-р инж., УАСГ, Катедра "Хидравлика и Хидрология", 1046 София, бул. "Христо Смирненски" 1, e-mail: [sava371@abv.bg](mailto:sava371@abv.bg).

<sup>4</sup> Петър Тодоров, инж., УАСГ, Катедра "Хидравлика и Хидрология", 1046 София, бул. "Христо Смирненски" 1, e-mail: [peter\\_v@gyuvetch.bg](mailto:peter_v@gyuvetch.bg)

## 1 Въведение

По време на нормалната експлоатация на водноелектрическите централи е възможно да настъпи аварийно отпадане на товара, което при наличието на реактивни турбини би довело до сериозно повишаване на оборотите на агрегата. Това налага възможно най-бързото ограничаване на достъпа на вода към турбината. При наличие на дълги напорни тръбопроводи бързото спиране на водата води до появата на хидравличен удар, който се явява основен оразмерителен случай за определянето на параметрите на самия тръбопровод.

При нисконапорни деривационни ВЕЦ често се използва схема на застрояване, при която водата постъпва към сградоцентралата посредством напорен басейн, намиращ се в края на открит деривационен канал. При рязкото спиране на течението на водата в края на канала, се образуват вълни, които се разпространяват по цялата му дължина, т.е. наблюдава се нестационарно течение.

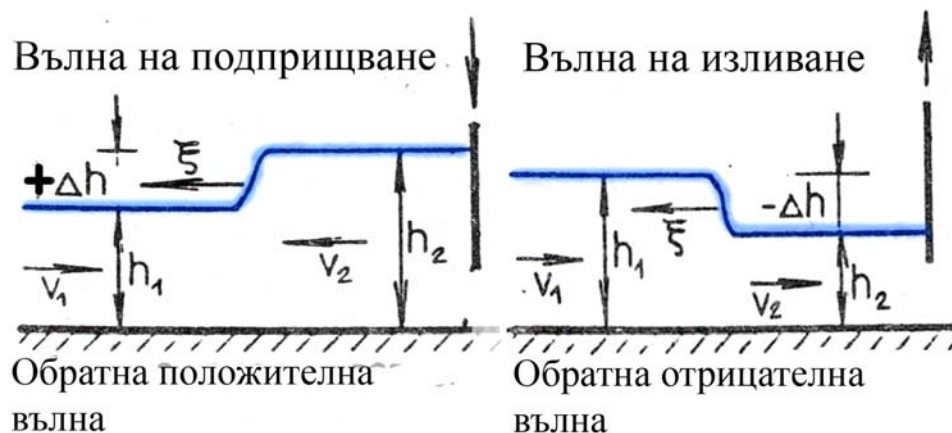
## 2 Нестационарно течение в открити легла

Нестационарните течения, предизвикани от промяна в степента на отваряне на затворните органи, могат да спадат към две основни групи - на т.нар. **прекъснати вълни** и на т.нар. **транслационни вълни**.

При прекъснатите вълни се наблюдава пренасяне на водни маси, при което вълновият фронт е много ясно изразен и стръмен. Поради тази причина вече не се наблюдава плавно изменящо се течение в тази зона и следователно този тип течения спадат към бързоизменящите се нестационарни течения.

Вълните се класифицират по два основни признака – промяна на водното ниво и посока на разпространение на фронта. По първия признак вълните се определят като **положителна** – когато предизвиква повишаване на водното ниво- и **отрицателна** – когато предизвиква понижаване на нивото.

Според втория признак вълните се делят на **права вълна** с посока на разпространение на фронта по посока на течението и **обратна вълна** с посока на разпространение на фронта, обратно на посоката на течението.



Фиг. 1 Обратна положителна и обратна отрицателна вълна, Маринов (1994)

Комбинирайки тези два признака, се получават четири основни типа вълни. В настоящото изследване интерес представляват вълната на подприщване, която е обратна положителна вълна, и вълната на изливване, която се явява обратна отрицателна вълна (Фиг. 1).

За изчисляването на основните параметри на вълната – скоростта на разпространение на фронта на вълната, дълбочината и скоростта на течението зад фронта на вълната се използват две основни уравнения – **уравнението на непрекъснатостта** и **уравнението за количеството движение**. Също така е необходимо да се въведе още едно допълнително уравнение, което да дефинира граничните условия, които формират фронта на вълната.

В конкретния случай, поради големите маси на затворните органи, се изключва рязко маневриране с тях. Това създава условия за формиране на **транслационни вълни**, при които са налице условията за плавна изменяемост. В този случай може да се приеме хидростатичен закон за разпределение на налягането. Това дава основание за прилагане на диференциалните уравнения на Сен-Венан за нестационарно еднодименционално течение. Тези уравнения са валидни за призматични легла, при приемането, че скоростите са разпределени равномерно в напречното сечение.

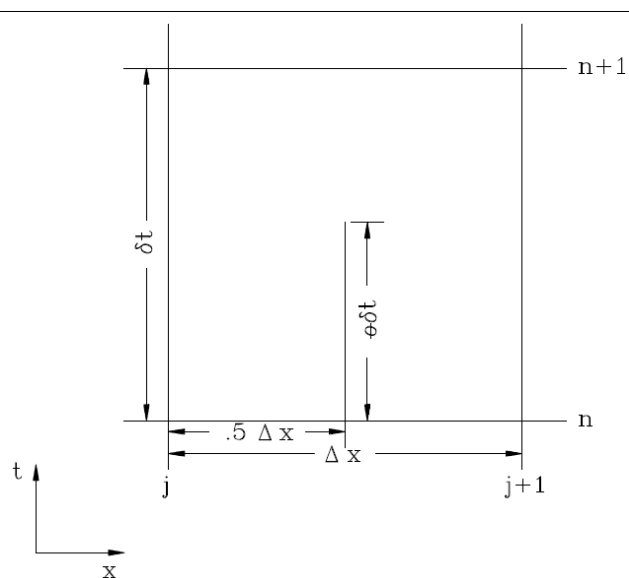
Аналогично на случая с прекъснатите вълни и тук основните уравнения се извеждат въз основа на уравнението на непрекъснатостта и уравнението за количеството движение, както и на допълнително уравнение за граничните условия.

След серия математически преобразувания се извеждат уравненията на Сен-Венан:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right) + g\omega \frac{\partial h}{\partial s} - g\omega(i_0 - i_f) = 0 \\ B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \end{array} \right.$$

Аналитичното интегриране на тази система уравнения е възможно само за някои частни случаи, поради тази причина е възприето решението да се извършва посредством числени методи. Най-често използваните са метод на характеристиките, метод на крайните разлики, метод на крайните елементи и други.

В настоящото изследване интегрирането е извършено по метода на крайните разлики. Използвана е 4-точкова схема, позната като бокс схема (Фиг. 2). По тази схема се изчисляват пространствени производни и функционални зависимости във вътрешна точка  $(n+\theta)\Delta t$ . По този начин стойностите в  $(n+1)\Delta t$  влизат във всички членове на уравненията. За протежението на участъкът, който се смята, се получава система от едновременни уравнения. Едновременното решение е важен аспект на тази схема, защото тя позволява информацията от цялото протежение да повлияе на решенията във всяка точка. Това позволява избор на времева стъпка, значително по-голяма от тази при другите типове числени модели. Анализите за устойчивост, проведени от Fread (1974) и Liggett и Cunge (1975), показват, че схемата на крайните разлики е устойчива за  $0.5 < \theta \leq 1.0$ , относително стабилна за  $\theta = 0.5$  и нестабилна за  $\theta < 0.5$ .



**Фиг. 2 Изчислителна клетка по метода на крайните разлики**

На практика има много фактори, които могат да допринесат за нестабилност на схемата за решение. Такива фактори могат да бъдат резки промени в напречните сечения на канала, резки промени в наклона, характеристиките на самото течение и сложните хидротехнически съоръжения като диги, мостове, водостоци, бентове или преливници.

Хидравличните изчисления, които се съдържат в настоящото изследване са реализирани с помощта на математическия модел HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) версия 4.1, разработен от корпуса на военните инженери на САЩ (U.S. Army Corps of Engineers).

Моделът дава възможност за изчисляване на редица хидравлични параметри на течението, като дълбочината на течението (котата на свободната водна повърхност), широчината на водното огледало, котата на енергийната линия, наклонът на триене, скоростта на течението, критичната дълбочина (котата на линията на критичните дълбочини), обема вода под изчисления профил и хидравличния режим, при който се придвижва водното течение във всяко изследвано сечение.

### **3 Създаване на хидравличен модел на горния деривационен канал на МВЕЦ “Кунино”**

#### **3.1 Описание на изследвания участък**

Обект на изследването е МВЕЦ Кунино - нисконапорна деривационна ВЕЦ, обработваща течащите води на р. Искър. Хидровъзелът е разположен в близост до село Кунино и има всички основни съоръжения, присъщи за този тип централа – яз с рибен проход, водохващане с утайник, деривационен канал, напорен басейн, сградоцентралата и долна вада.

Основно внимание е обърнато на деривационния канал, като основно място, в което се развиват нестационарните вълни, но също така предвид са взети и сградоцентралата и напорния басейн, в които са разположени затворните органи, които предизвикват образуването на вълните.

Каналът е с обща дължина ок. 2620 m и условно е разделен на няколко участъка с различни напречни сечения и облицовки. Основният участък е с дължина ок. 2100 m, ширина на дъното 5.4m , дълбочина 4.2m и наклон на откосите 1:1.5. Следват къс участък (ок. 100 m) с ширина на дъното 2.6 m и втори типовой напречен профил с ширина на дъното 4 m и дължина ок. 500 m.

Напорният басейн служи като изравнител пред централата. Връзката му с канала става посредством преходен участък. Дясната стена е изградена като преливник. Предвиден е и дънен изпускател – потопен затвор с  $b=3.85\text{m}$  и  $h=3.0\text{m}$ . Именно този савак трябва да поеме излишните водни количества при спиране на работа на централата.

Основната цел на настоящото изследване е да бъдат определени параметрите на пораждащите се вълни на подприщване и изливане при спиране на притока на вода към турбините на централата, респ. при възстановяване на нормалната и експлоатация с оглед оптимизиране на управлението на затворните органи. Първата основна задача е да бъде определена максималната дълбочина на вълната на подприщване, образуваща се при затваряне на направляващия апарат на турбината, и да бъде определена скоростта на отваряне на аварийен савак – байпас, който да осигури понижаване на водното ниво така, че да не се предизвика преливане над оградните стени на канала.

Втората основна задача е да се определи степента на отваряне и скоростта на опериране със савака – байпас така, че да се установи възможно най-бързо стационарно течение в канала със застроеното водно количество, както и да не се допусне изпразване на канала. По този начин може възможно най-бързо да се възстанови нормалната експлоатация на централата.

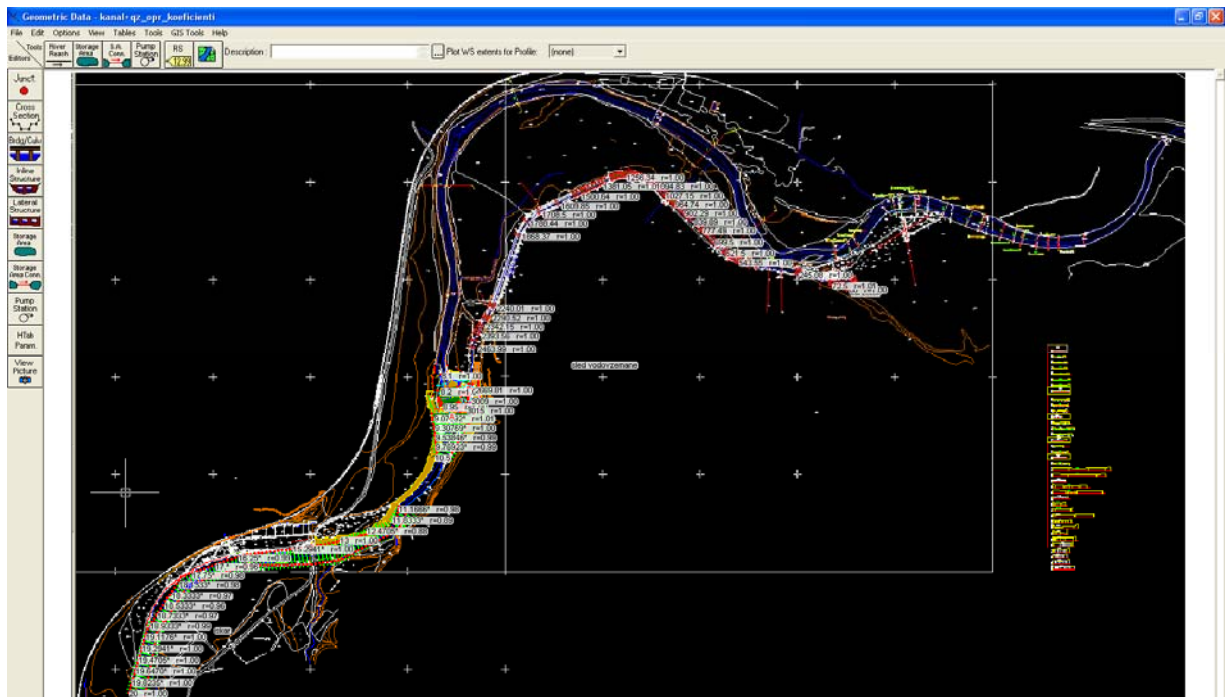
### **3.2 Кратко описание на използвания хидравличен модел и изследваните случаи**

Хидравличните изчисления, които се съдържат в настоящото изследване, са реализирани с помощта на математическия модел HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) версия 4.1, разработен от корпуса на военните инженери на САЩ (U.S. Army Corps of Engineers).

Моделът дава възможност за изчисляване на редица хидравлични параметри на течението като дълбочината на течението (котата на свободната водна повърхност), широчината на водното огледало, котата на енергийната линия, наклонът на триене, скоростта на течението, критичната дълбочина (котата на линията на критичните дълбочини), обема вода под изчисления профил и хидравличния режим, при който се придвижва водното течение във всяко изследвано сечение.

За целите на настоящото изследване е построен цялостен георефериран модел на проектната ситуация (Фиг. 3), като са взети предвид всички съоръжения по пътя на водата. При изграждането на модела се целеше максимално точно пресъздаване на реалните параметри, като опростяващите предпоставки са сведени до минимум. Участъкът от модела, разглеждащ деривационния канал е построен като са спазени всички проектни параметри – въведени са всички съоръжения по дължина на канала – водохващане и утаечна камера със съответните преливници, саваци и др. Отчетени са промените в облицовката на канала по дължината му, както и стеснението на сечението при пресичането на канала и съществуващия аквадукт. Моделирани са всички преходни участъци и напорния басейн,

както и преливните съоръжения в напорния басейн. Всички саваци на различните съоръжения са моделирани като подвижни, така че максимално точно да могат да се симулират режимите им на работа и да се определят параметрите, при които трябва да се експлоатират. С цел точното определяне на коефициентите на саваците и преливниците и цялостното калибриране на модела са извършени сметки по утвърдените формули за изтичане изпод щит при потопен и непотопен режим на работа, както и за преливане над преливник отново за различните случаи на потапяне. Коефициентите на грапавина са подбрани според условията в различните участъци.



**Фиг. 3** *Обща ситуация на различните участъци на модела и разположение на напречните профили*

Изследвани са случаи на отпадане на товара при различни водни количества, като са определени два меродавни случая:

1. случай – по канала протича застроеното водно количество и централата работи при проектно ГВН.
2. случай – по канала протича форсирано водно количество със  $7.84 \text{ m}^3/\text{s}$  над застроеното и централата работи при ГВН с 9 cm над проектното, с цел осигуряване на брутен напор, по-голям от минималния. За поддържане на ГВН, аварийният савак е отворен на 0.3 m и работи като байпас за излишните  $7.84 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Изходните параметри на изследването са :

- Време за затваряне на направляващия апарат при отпадане на товара – 8 sec.
- Светъл отвор на савака –  $b=3,85 \text{ m}$  ,  $h=3 \text{ m}$
- Скорост на отваряне на савака –  $0.55 \text{ m/min}$

### 3.3 Резултати от хидравличното изследване и препоръки

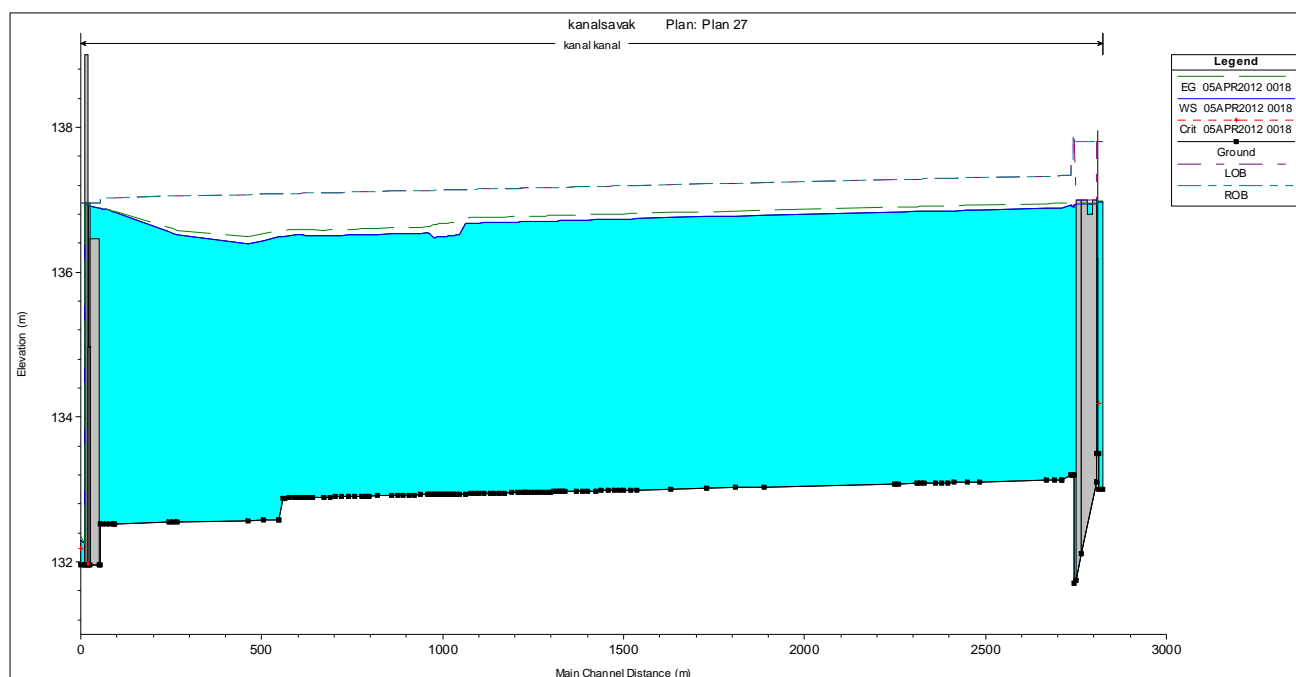
Накратко са описани получените крайни резултати за двата описани по-горе случая.

#### Случай 1:

При случай 1 моделът е построен, така че през централата да протича застроеното водно количество и да се поддържа проектното водно ниво в напорния басейн на централата. При стационарен режим на движение на течението (нормална работа на централата) водното ниво пред яза се изчислява с отчитане на загубите на напор при входното съоръжение и утайника и по дължината на канала (вкл. отчитане на местните загуби при стеснението под моста и аквадукта, преходния участък).

Повишението на водното ниво в напорния басейн при нестационарен режим на движение (аварийно затваряне на направляващите апарати) е отчетено при начало на отваряне на савака в момента, в който направляващите апарати са напълно затворени с оглед повишаване сигурността на съоръжението.

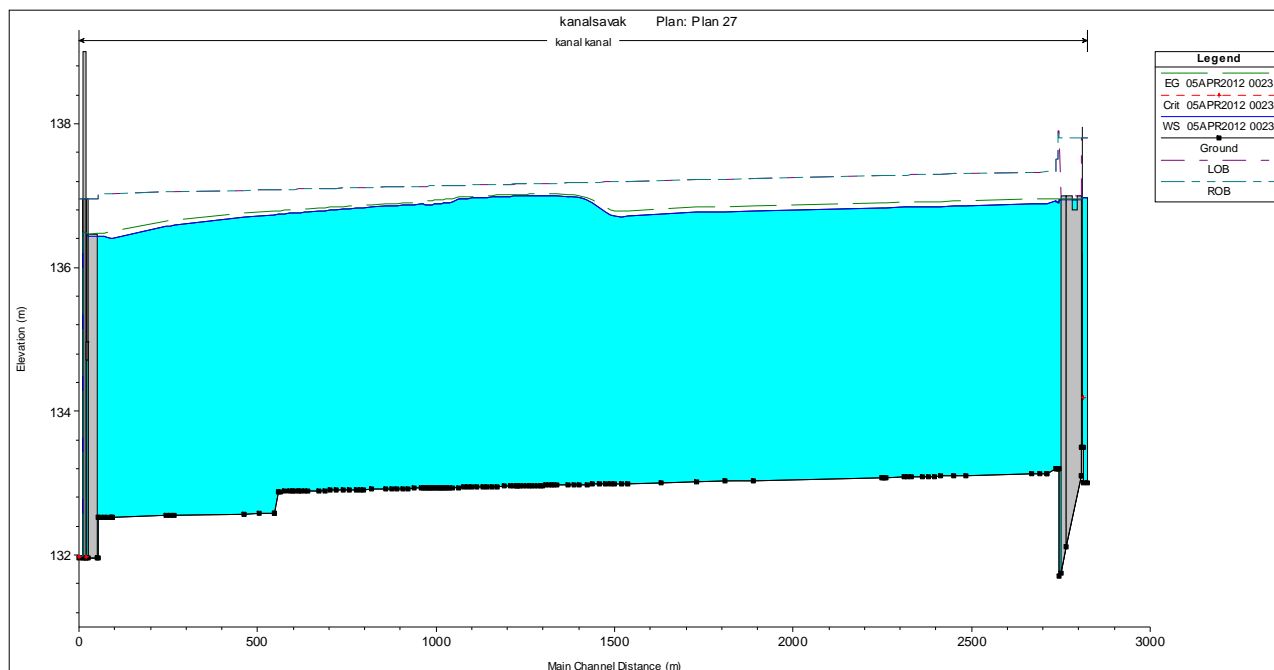
Повишението на водното ниво в напорния басейн пред централата при отпадане на товара е **46 cm** при зададена скорост на отваряне на савака 0.55 m/min (Фиг. 4).



**Фиг. 4** Максимално повишение на водното ниво в напорния басейн при аварийно изключване на ВЕЦ и протичане на застроено водно количество

Времето за разпространение на вълната до достигането и до езерото е 10 мин (Фиг. 5).

Препоръчва се отварянето на савака да започне в момента на отпадане на товара (начало на затваряне на направляващ апарат) и да продължи до 2.2 м. При достигане на отвор 2.2 м савакът може да спре да се отваря, като по този начин ще пропуска водните количества, идващи по канала, запазвайки водно ниво в напорния басейн равно на проектното.



**Фиг. 5** Разпространение на вълната в канала при аварийно изключване на ВЕЦ и протичане на застроено водно количество

*Случай 2:*

От гледна точка на сигурността Случай 2 е оразмерителен за съоръжението. Централата обработва застроено водно количество, но при постъпващо по реката водно количество по-голямо с ок. 35 %, което е максималното водно количество, при което централата може да работи. Водното ниво в напорния басейн е с 9 cm по-високо от проектното. Тази кота е подбрана след анализ на резултатите от множество изследвани варианти така, че да бъде максимално висока, за да позволява работа на централата (в този режим на работа има високо ДВН), но да не предизвика преливане над оградните стени на басейна при аварийно изключване на турбината.

За да се осигури протичане на застроеното водно количество през турбините, е необходимо излишното водно количество да премине през преливника и частично отворения савак (отвор 0.3m).

При отпадане на товара се разглежда следната схема:

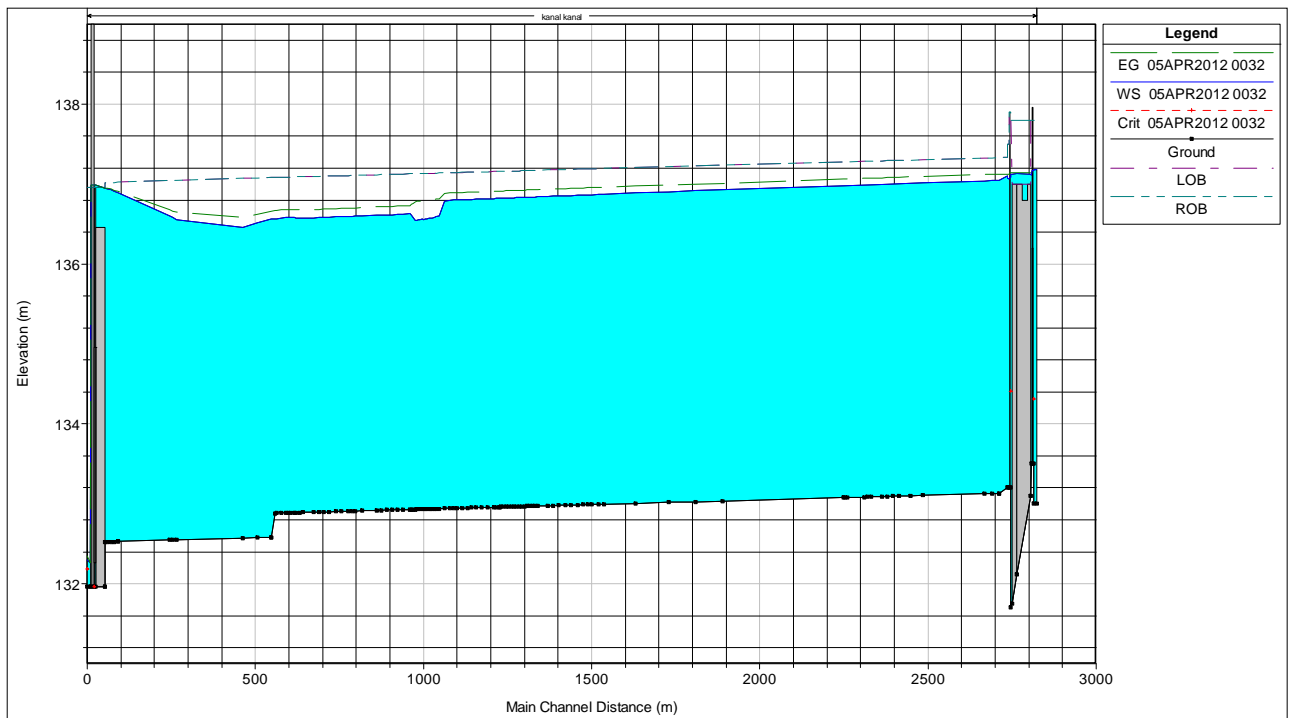
Аварийният савак е отворен на 0.3 м .

Направляващите апарати затварят напълно.

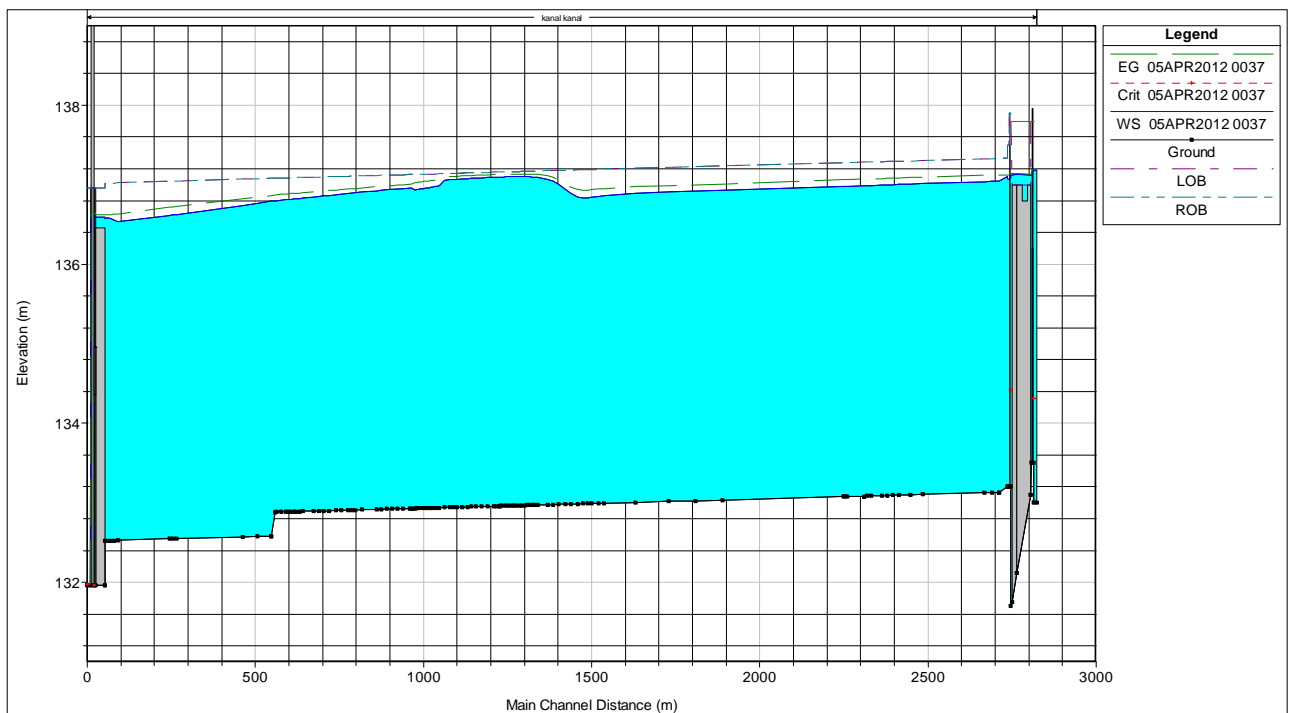
Започва отваряне на аварийния савак със скорост 0.55m/min до височина 2.4 m. .

Резултатът е максимално повишение на водното ниво в напорния басейн с **53 cm** (Фиг. 6 и Фиг. 7).





**Фиг. 6** Максимално повишение на водното ниво в напорния басейн при аварийно изключване на ВЕЦ и форсирано водно количество



**Фиг. 7** Разпространение на вълната в канала при аварийно изключване на ВЕЦ и форсирано водно количество

С цел предотвратяване на преливането над оградните стени на напорния басейн, се препоръчва надграждането им в зоната на преходния участък и напорния басейн с 20 см.

При отпадане на товара на ВЕЦ е целесъобразно каналът да остане запълнен с вода, за да може максимално бързо да се осигури възстановяване на работата на централата без

необходимост от ново пълнене на канала. Направени са симулации за случаи на аварийно изключване на централата при различни водни количества, протичащи по канала. Определени са височините, до които трябва да се отвори аварийния савак и на които трябва да остане отворен, за да пропуска идващото по канала водно количество като се запази съответното ГВН за всеки един случай. При възстановяване работата на централата, непосредствено трябва да започне затваряне на савака до необходимата степен за поддържане на ГВН. По този начин се получават най-малки колебания на нивата в напорния басейн и канала.

#### **4 Заключение**

Настоящият пример идва да покаже, че подробното хидравлично изследване на нестационарните процеси, протичащи в деривационните канали на ВЕЦ, носи безценна информация както за оразмеряването на съоръженията, така и за оптимизирането на работата на централата по време на нейната експлоатация. Въпреки това в инженерната практика важноста на подобни детайли изследвания често се пренебрегва, което води до възникване на проблеми.

Получените подробни резултати могат да бъдат използвани като изходни данни за определяне на параметрите за автоматизирано управление на централата, което значително би подобрило нейните експлоатационни характеристики.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Amein, M. and Fang, C.S., 1970, "Implicit Flood Routing in Natural Channels", Journals of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 96
- [2] Chow, V.T., 1959, Open Channels Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, NY
- [3] Fread, D.L., 1976, Theoretical Development of an Implicit Dynamic Routing Model, Hydrologic Research Laboratory, U.S. Department of Commerce
- [4] Liggett, J.A., and Cunge, J.A., 1975, "Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations" in Unsteady Flow in Open Channels, edited by K. Mahmood and V. Yevjevich, Vol. I, Chapter 4, Water Resources Publications
- [5] Shames, I.H., 1962, Mechanics of Fluids, McGraw-Hill Book Company, NY
- [6] Директива 2007/60/ЕС относно оценката и управлението на риска от наводнения
- [7] Маринов, Е., Хидравлика, Висш институт по архитектура и строителство, София, 1994
- [8] Чоу В.Т., Гидравлика открытых каналов, Москва, 1969 г.