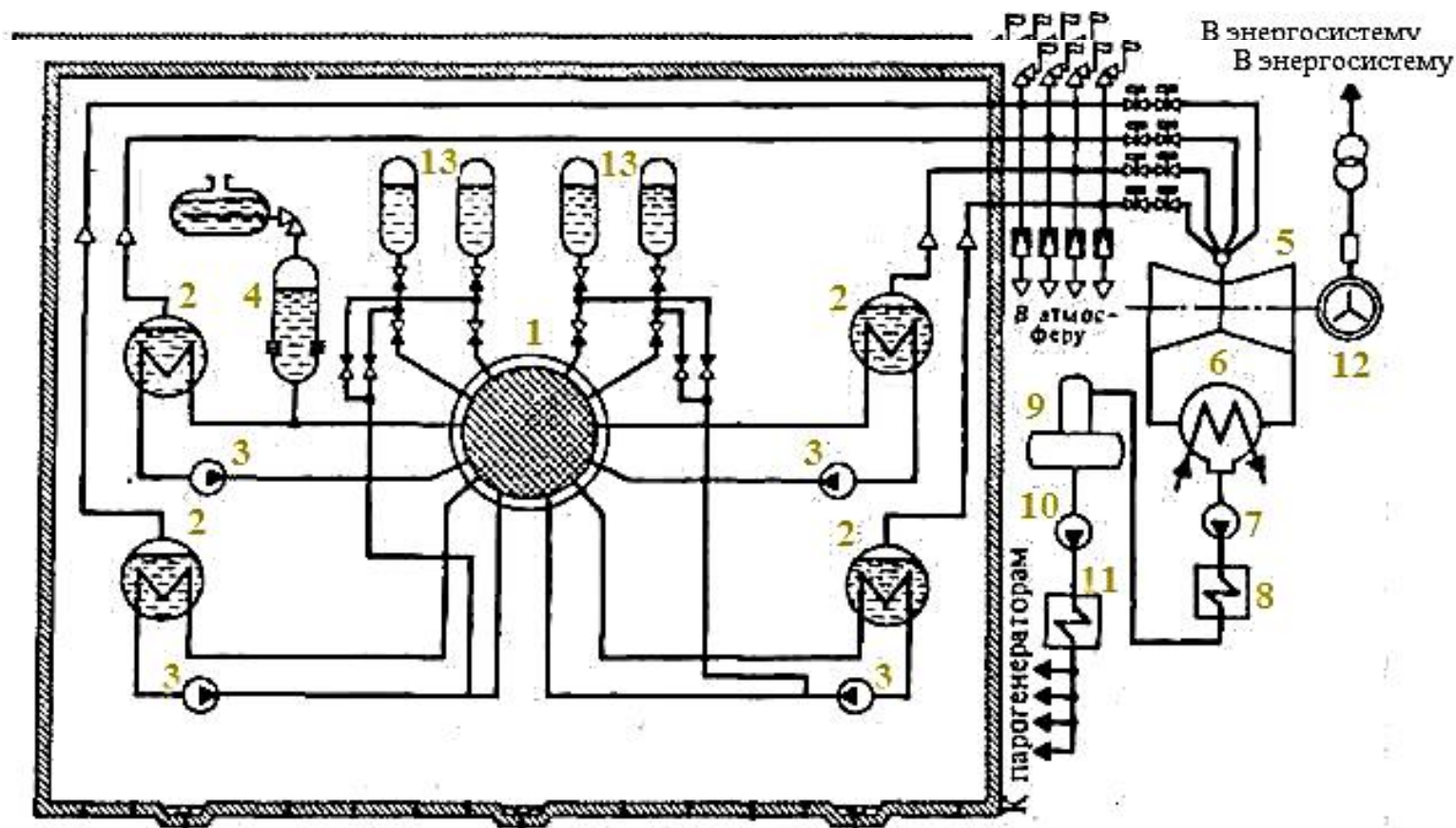


V Международная н.п. конференция
«Автоматизированные системы управления
технологическими процессами», 18 марта 2025 г.

ЭКОНОМИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ АЭС С ВВЭР

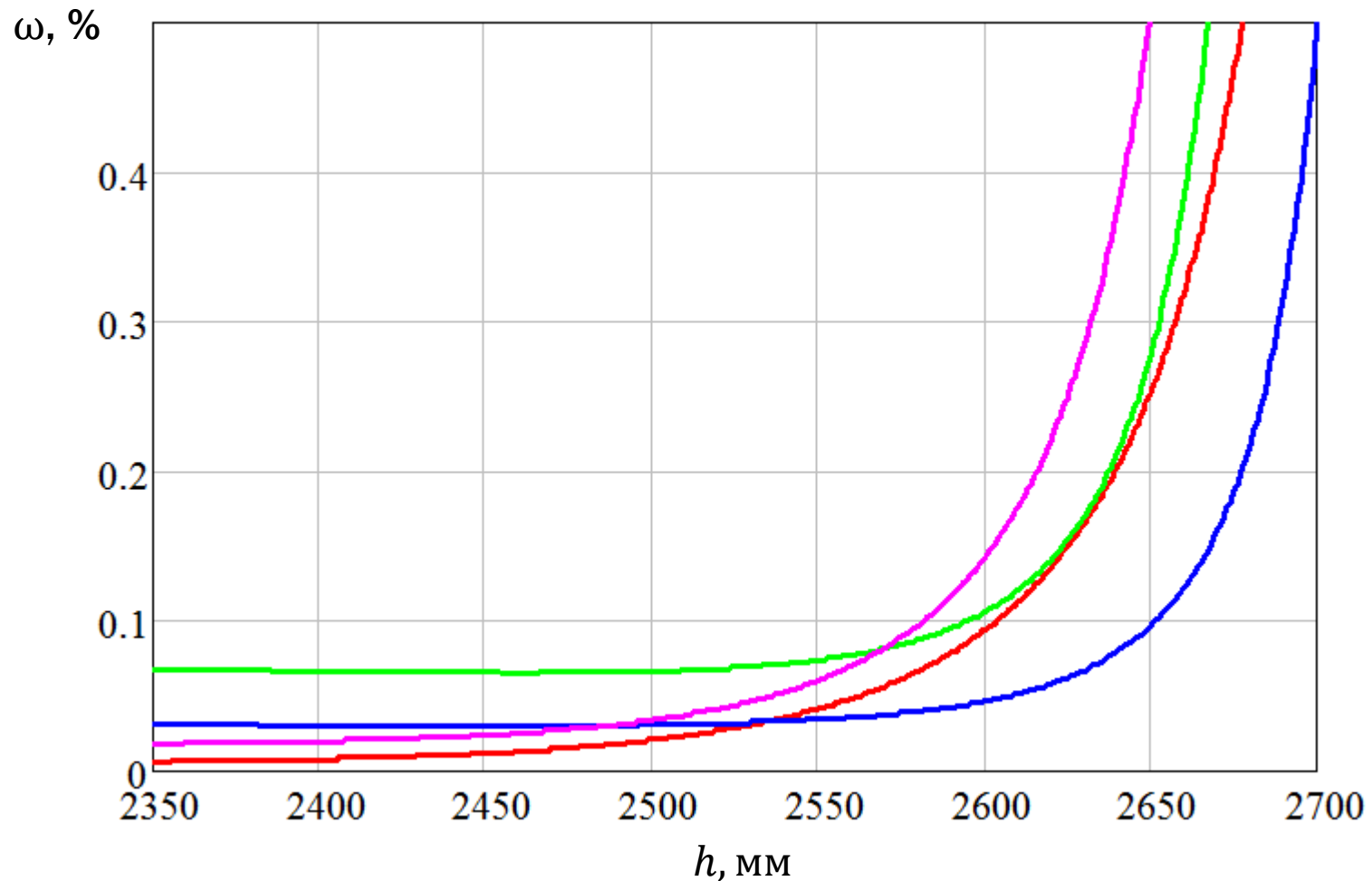
Автор: Парчевский Валерий Михайлович (НИУ «МЭИ»)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭНЕРГБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000



1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — ГЦН; 4 — компенсатор объема; 5 — турбина;
6 — конденсатор; 7 — конденсатный насос; 8 — группа ПНД; 9 — деаэратор;
10 — питательный насос; 11 — группа ПВД; 12 — генератор; 13 — гидроаккумулирующая емкость.

РАЗБРОС СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ



ДВУМЕРНАЯ СЕПАРАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

$$\omega_a = \frac{a_1(d)}{[a_2(d) + h]^2} + \frac{a_3(d)}{a_2(d) + h} + a_4(d)$$

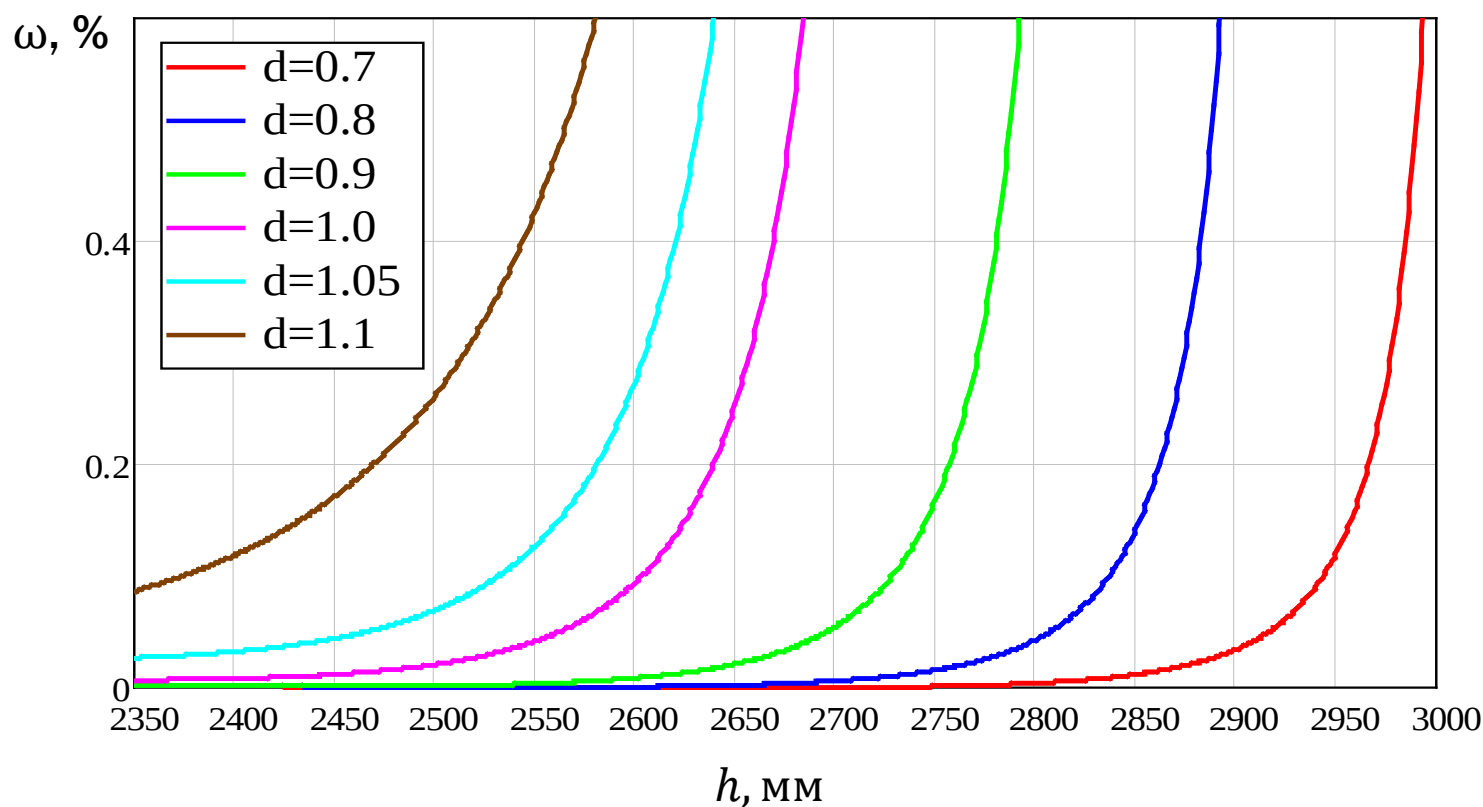
$$a_1(d) = \frac{a_{10}}{a_{11} + d} + a_{12}$$

$$a_2(d) = a_{20} + a_{21}d + a_{22}d^2 + a_{23}d^3 + a_{24}d^4 + a_{25}d^5$$

$$a_3(d) = \frac{a_{30}}{a_{31} + d} + a_{32}$$

$$a_4(d) = a_{40} + a_{41}d + a_{42}d^2 + a_{43}d^3 + a_{44}d^4 + a_{45}d^5 + a_{46}d^6$$

ДВУХМЕРНАЯ СЕПАРАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАЗНЫХ НАГРУЗКАХ



КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ (ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ)

$$R = L - P$$

где

R (Result) – суммарный ущерб (целевая функция), руб/ч;

L (Loss) – экономические потери, руб/ч;

P (Profit)– выгода, руб/ч,

причем

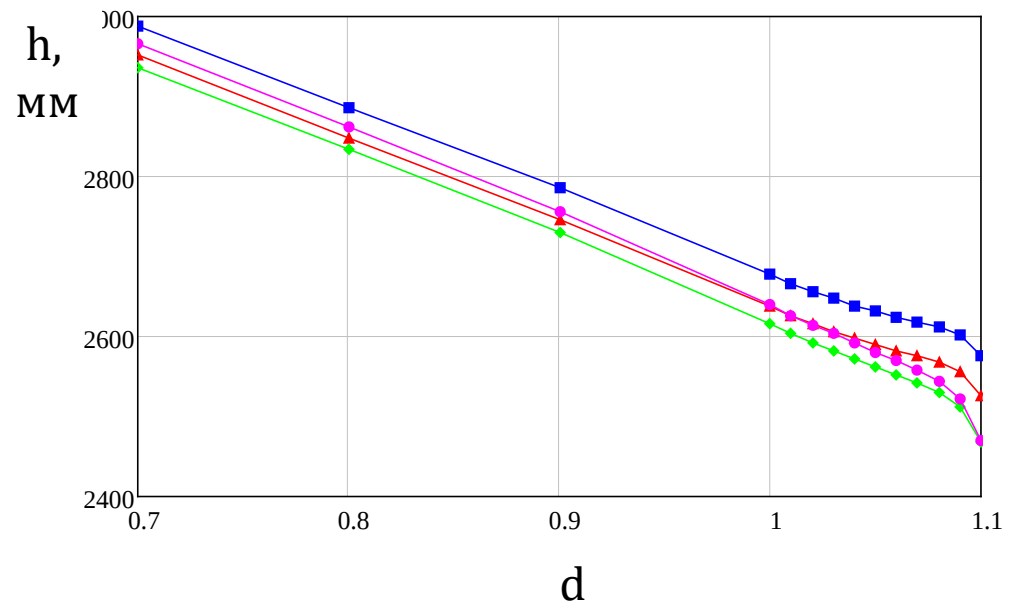
$$R, L, P = f(h1, h2, h3, h4, d1, d2, d3, d4)$$

ОГРАНИЧЕНИЯ НА УРОВНИ ВОДЫ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

$$h_i^{min} \leq h \leq h_i^{max}$$

2350 мм

$$\omega \leq 0,2\%$$



ЭКОНОМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

По данным ОАО «ВНИИАМ»:



ω

на 1%



η_{oi}

на 0,85 %



N

на 7 МВт

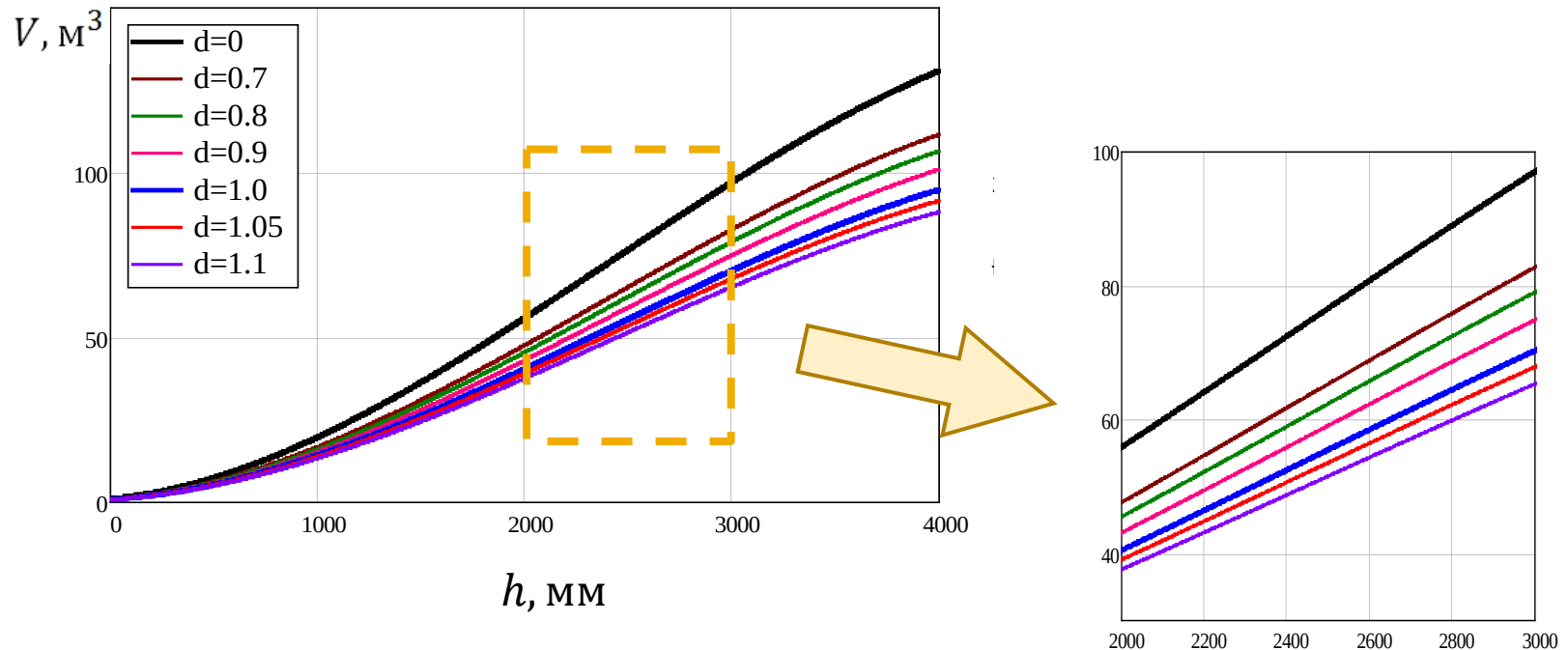
При себестоимости вырабатываемой
электроэнергии 1,5 руб/(кВт*ч)
потери составляют 10500 руб/ч
....или 92 млн руб/год



СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ, ОТРАЖАЮЩАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

■ РАСЧЕТ СУММАРНОГО ОБЪЕМА ВОДЫ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Зависимость объема воды в парогенераторе от уровня при разных нагрузках



СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ, ОТРАЖАЮЩАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Оценка стоимости запаса воды в парогенераторе

$$Z = E \cdot K + C$$

$$Z = 57,07$$

руб/(м³·ч)

где

Z – годовые затраты, руб/год;

E – ставка рефинансирования ЦБ РФ, отражающая нижний порог эффективности капитальных вложений;

K – капитальные затраты на приобретение, монтаж и вывод из эксплуатации оборудования САОЗ, руб/год;

C – годовые эксплуатационные затраты на поддержание в работе САОЗ, руб/год.

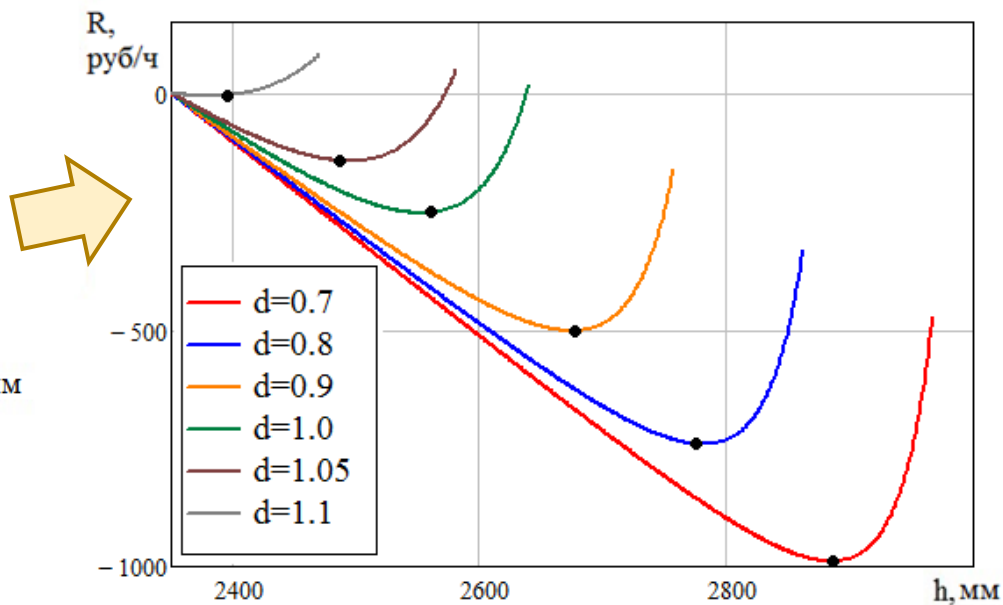
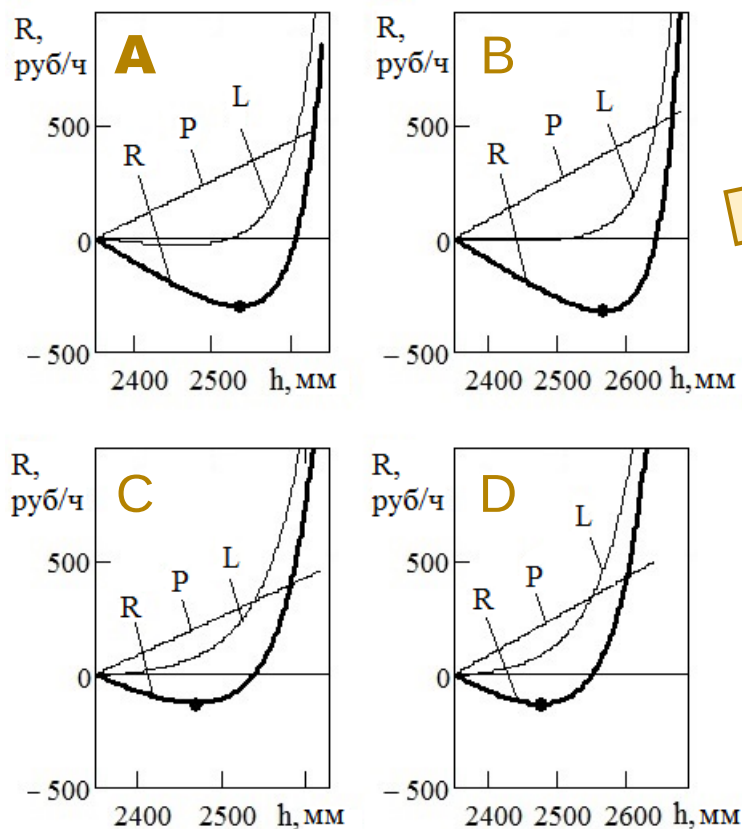
ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ВОДЫ В ГИДРОЕМКОСТЯХ ПАССИВНОЙ САОЗ

СТРУКТУРА УЧИТЫВАЕМЫХ ЗАТРАТ (в ценах 2016 г.)

№ п/п	Наименование элементов затрат	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Значение
1	Полные затраты	Z	руб/год	$E \cdot K + C$	$1,0005 \cdot 10^8$
1.1	Затраты на 1 м³/ч	zw	руб/(м³/ч)	$Z / (V_{pv} \cdot h)$	57,07
2	Ставка рефинансирования ЦБ РФ	E	-	-	0,1028
3	Капитальные затраты на приобретение, монтаж и вывод из эксплуатации	K	руб	$K1 + K2 + K3 + K4$	$5,686 \cdot 10^8$
4	Годовые эксплуатационные затраты	C	руб/год	$C1 + C2 + C3 + C4$	$4,159 \cdot 10^7$
Структура капитальных затрат					
3.1	Поставка и монтаж оборудования	K1	руб		$1,706 \cdot 10^8$
3.2	Строительные и монтажные работы (СМР)	K2	руб	$1,667 \cdot K1$	$2,843 \cdot 10^8$
3.3	Проектно-изыскательские работы (ПИР)	K3	руб	$0,375 \cdot K1$	$0,6398 \cdot 10^8$
3.4	Иные расходы	K4	руб	$0,292 \cdot K1$	$0,4976 \cdot 10^8$
Структура эксплуатационных затрат					
4.1	Амортизационные отчисления	C1	руб/год	$K \cdot (1/T)$	$1,895 \cdot 10^7$
4.2	Вывод из эксплуатации	C2	руб/год	$0,25 \cdot C1$	$0,4739 \cdot 10^7$
4.3	ТОИР	C3	руб/год	$0,0669 \cdot K1$	$1,175 \cdot 10^7$
4.4	Прочие издержки	C4	руб/год	$0,20 \cdot (C1 + C3)$	$0,6142 \cdot 10^7$

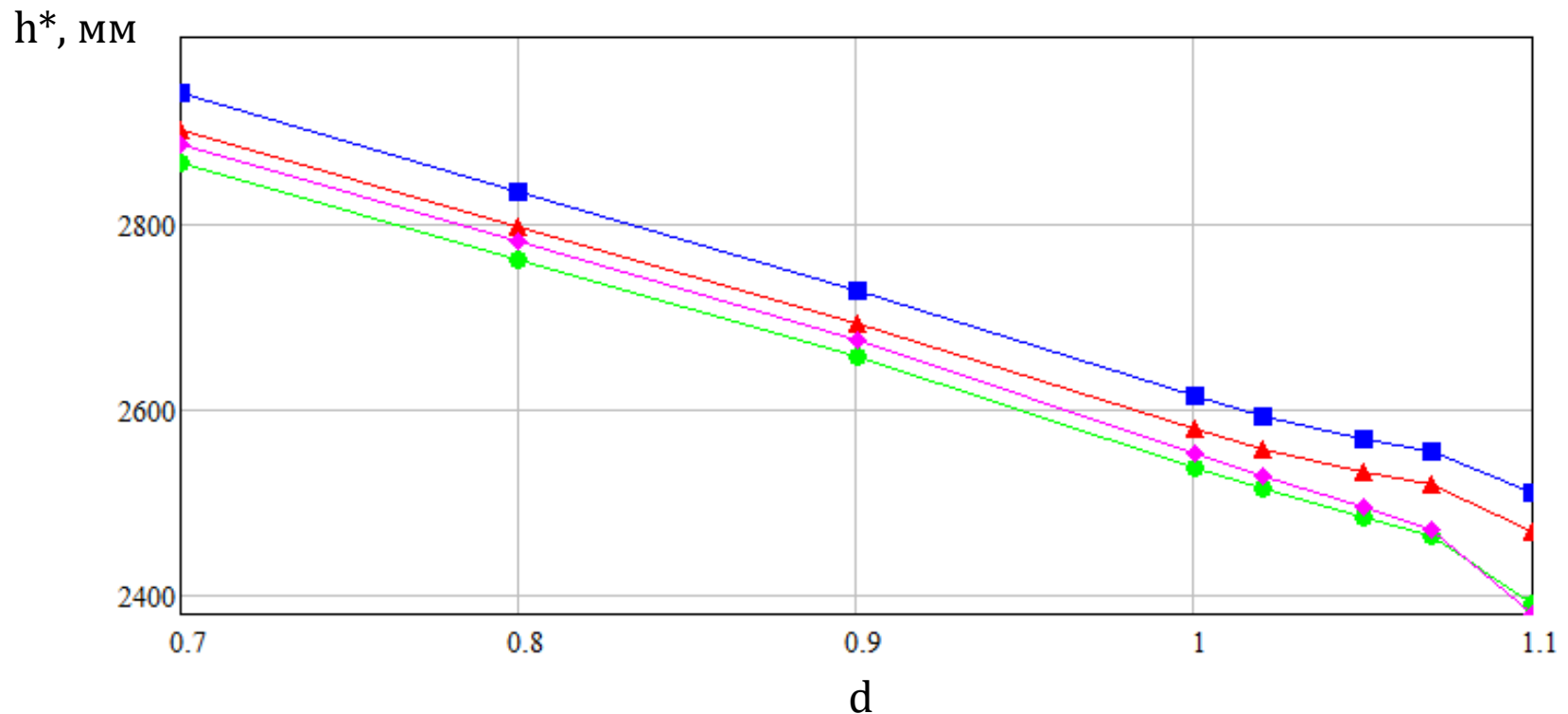
РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УРОВНЕЙ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Номинальная нагрузка



* Семейство кривых построено с учетом того, что на парогенераторе **В** имеется возможность варьировать значение уровня, а на других ПГ установлено минимально возможное значение уровня - 2350 мм.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ УРОВНЕЙ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ



* Семейство кривых построено для случая, когда на всех парогенераторах установлены оптимальные значения уровня воды, полученные в результате минимизации целевой функции .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Определение оптимального уровня воды в парогенераторе АЭС по **КОМПЛЕКСНОМУ** критерию существенно смещает значение уровня в сторону больших значений;
- **Эффект** от использования ДСХ в управлении работой парогенераторов (по сравнению с базовым вариантом, когда уровень на всех ПГ установлен 2400мм) тем **больше**, чем **ниже нагрузка**, на которой работает ПГ.

d	0,7	0,8	0,9	1,0	1,05	1,1
$U_{\text{опт}} - U_{2400}$, руб/ч	-3769	-2779	-1838	-890	-509	-129

* Знак «-» означает, что есть выигрыш от установления на парогенераторах оптимальных уровней.

**СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ**