

С.О. КОСТЕНКО, аспірант,
В.Г. НОВОХАТНІЙ, кандидат технічних наук
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ З ОДНОТИПНИМИ НАСОСАМИ

Запропоновано автоматизувати частину розрахунків водопровідних насосних станцій.

Ключові слова: насосні станції; програмне забезпечення; надійність.

Предложено автоматизировать часть расчетов водопроводных насосных станций.

Ключевые слова: насосные станции; программное обеспечение; надежность.

Proposed to automate part of the calculation of water pumping stations.

Key words: pumping station; software; reliability.

Постановка проблеми. Процес проектування технологічної частини насосних станцій (НС) систем водопостачання передбачає наступні операції.

1. Вибір за каталогами насосних агрегатів для заданого режиму водоподавання та визначення кількості робочих і резервних насосів.

2. Виконання обв'язки насосних агрегатів трубами і арматурою та розрахунки надійності технологічної схеми.

3. Компонування насосних агрегатів на плані будівлі технологічної частини НС з урахуванням необхідних відстаней між технологічним обладнанням.

Вказані операції значно залежать від досвіду проектувальника, тому що вони недостатньо формалізовані. Але останнім часом з'явилась можливість комп'ютерної автоматизації перших двох операцій. Тобто, є можливість вибрати необхідний насосний агрегат на відповідному сайті виробника насосних агрегатів, а обв'язку насосів трубами і арматурою виконати з умов надійності.

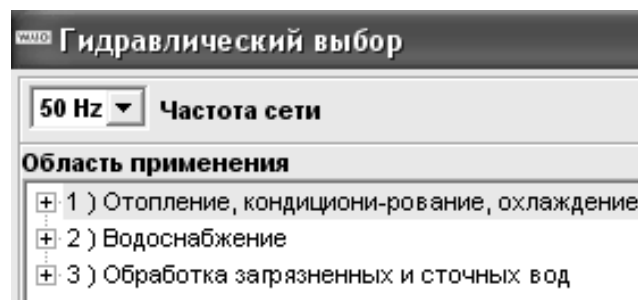
Аналіз останніх досліджень показує, що виробники насосів на відповідних сайтах (наприклад: www.wilo-spb.ru, net.grundfos.com та www.flygt.ru/3288204.asp. [1, 2, 3]) надають можливість вибору насосів різних марок. Програма розрахунку надійності технологічної частини водопровідних насосних станцій з відповідною обв'язкою насосів розроблена в Полтавському НТУ ім. Ю. Кондратюка мовою TURBO PASCAL [4].

Виклад основного матеріалу досліджень. Для технологічних розрахунків насосних станцій необхідними даними є подача, напір насосів та режим їх роботи. У розрахунках надійності початковими даними є надійність елементів насосної станції, а саме: насосних агрегатів, засувок та зворотних клапанів. Розрахунок надійності технологічної схеми насосної станції потрібно виконувати після технологічних розрахунків, коли визначена кількість робочих та резервних насосних агрегатів і виконана їх обв'язка трубами та арматурою.

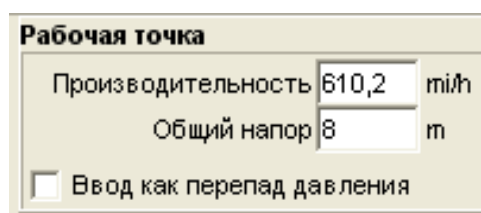
Технологічні (гідрравлічні) розрахунки. Для прикладу візьмемо невелике місто на 31,9 тис. жителів із загальним водоспоживанням 14645 м³/добу. Насосна станція першого підйому працює рівномірно протягом доби і її подача складає 610,2 м³/год, а розрахунковий напір становить 23 м, у тому числі: геометрична висота підйому 15 м, втрати напору 8 м. Відповідно до вимог [5], місто відноситься до II категорії надійності. Приймаємо два робочих і один резервний насосний агрегат.

Варіант 1. Скористаємося програмою Wilo-Select 3.1.10 [1] для вибору насосного агрегату. Послідовність роботи з комп'ютерною програмою наступна.

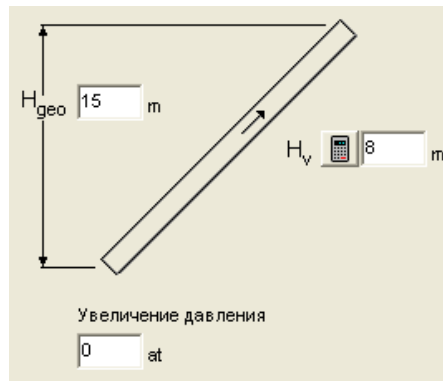
Крок 1. Вибираємо область застосування насосних агрегатів ("Водоснабжение").



Крок 2. Вводимо подачу (м³/год) та втрати напору (м).



Крок 3. Задаємо значення геометричної висоти підняття води. Для цього натискаємо на кнопку "Рабочая точка" і задаємо значення $H_{geo} = 15$ м.



Крок 4. Вибираємо тип установки насосів. Приймаємо паралельно підключені насоси. Кількість робочих насосних агрегатів – 2 та 1 резервний.

Скриншот інтерфейсу програми, що показує налаштування типу установки насосів. Вибрано опцію "Параллельно подключенные насосы". Кількість насосів встановлено на 2, а чекбокс "+ 1 резервный насос" позначено.

Крок 5. Вибираємо серію насоса, якщо вона відома, або всі серії, виділивши їх. Натискаємо на кнопку "Выбрать"

Програма виконує пошук насосних агрегатів та видає їх список.

Крок 6. Вибираємо насосний агрегат з максимальним ККД і виділяємо його.

Насос	Расходы на эл	Тип	Цена [EUR]	Арт. №	Мощность [кВт]	Мощность на	КПД [%]
SCP 150/290HA-30/4-T4-R	65959,76	Spiralgehäuse	По запр.	SCP 150/290H	30	22,99	82,89
SCP 150/390HA-30/4-T4-R	71332,33	Spiralgehäuse	По запр.	SCP 150/390H	30	24,86	82,73
HL 150/250-30-4-12-50Hz	6297921,17	Norm-консоли	По запр.	4109443	30	21,23	81,66
HL 150/315-30-4-12-50Hz	7115239,41	Norm-консоли	По запр.	4109447	30	23,99	80,6
SCP 200/310HA-30/4-T4-R	68001,21	Spiralgehäuse	По запр.	SCP 200/310H	30	23,7	79,89
NPG 200-355-30/4	8007911,03	Norm-консоли	По запр.	NPG20355 xxx	30	27	79,01
SCP 125/230HA-37/4-T4-R	75356,17	Spiralgehäuse	По запр.	SCP 125/230H	37	26,4	78,3

Крок 7. Програма буде паралельну роботу вибраних насосів та характеристику мережі і знаходить робочу точку (на рисунку 1 вона відмічена кутиком).

За допомогою цієї програми підбрано 2 насоси марки Wilo-SCP 150/290HA-30/4-T4-R1-ROHS/E1. Робоча точка має такі значення $Q = 611 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 23,1 \text{ м}$, $\text{ККД} = 82,9 \%$.

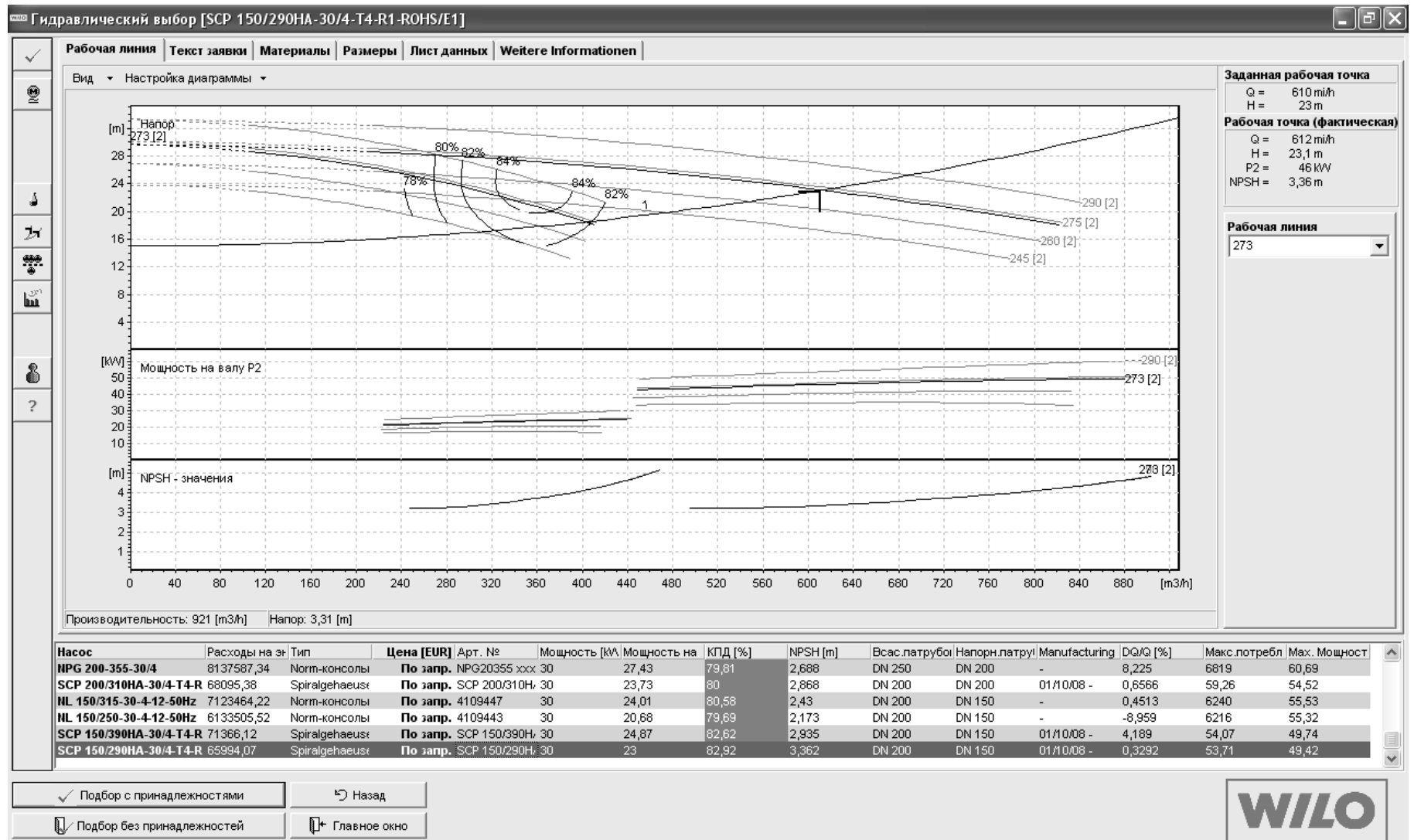


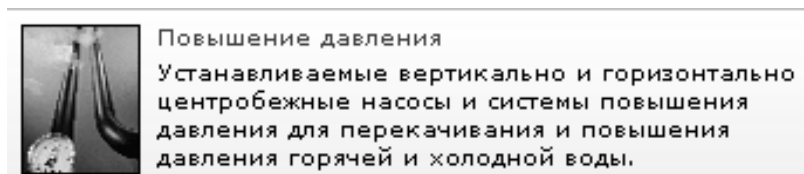
Рис. 1. Графік сумісної роботи насосів WILO на водогін

На рис. 1 у верхньому полі наведено графіки напірної характеристики вибрано насоса з різним діаметром робочого колеса, а саме: 290; 275; 260 та 245 мм. Також побудована напірна характеристика паралельної роботи двох насосів з різними діаметрами робочих колес. На графіках ці характеристики позначені цифрою 2 у квадратних дужках біля діаметра колеса. Дугами побудовані графіки ККД, а саме 84%; 82%; 80% та 78%. Напірна характеристика перетинається з характеристикою мережі у робочій точці (позначена кутиком) для діаметра робочого колеса 273 мм. Отримані технічні характеристики виводяться на екран з правої сторони від графіка сумісної роботи.

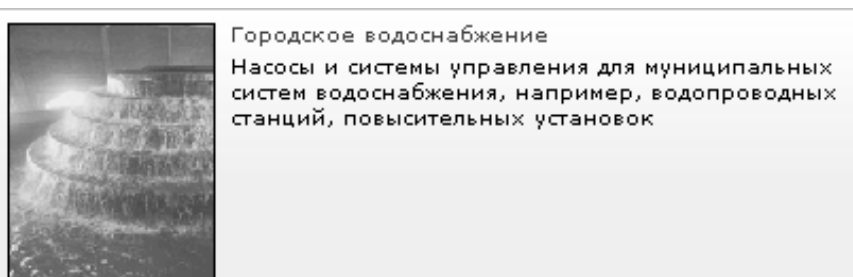
Варіант 2. Виберемо насосний агрегат за допомогою програми Grundfos WebCAPS – Computer Aided Product Selection (комп'ютерна автоматизація вибору продукту). Для цього заходимо на сайт [2].

Крок 1. Вибираємо вкладку “Подбор”.

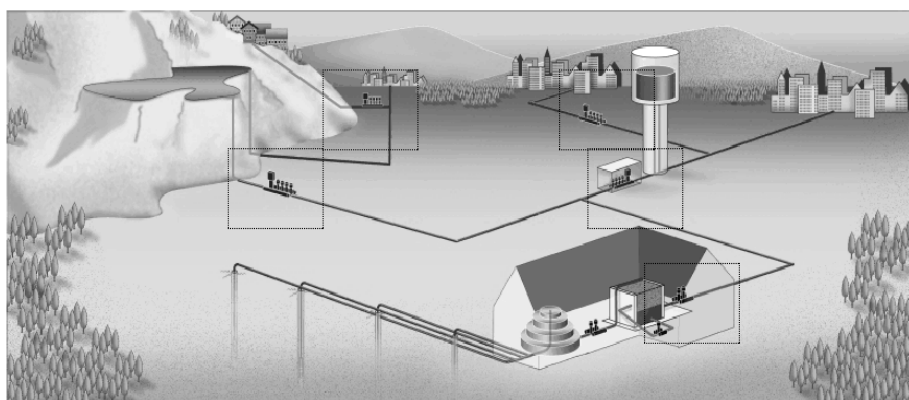
Крок 2. Вибираємо напрямок застосування “Повышение давления”.



Крок 3. Вибираємо область застосування “Городское водоснабжение”.



Крок 4. Вибираємо тип застосування на зображенні системи водопостачання



Крок 5. У відповідні поля вводимо: подачу (610,2 м³/год), геометричну висоту підняття (15 м), втрати напору (8 м), вільний напір.

Ваш запрос

Давление в водопроводе: 1 бар

Расход (Q) м³/ч

Геометрическая высота м

Потери напора на трение м

Свободный напор (у санитарно-технического прибора) бар

Минимальное гарантированное давление в наружном водопроводе бар

Среднее давление в наружном водопроводе бар

Максимальное давление в наружном водопроводе бар

Оценочный критерий

Давление нагнетания (насоса) бар

Общий напор м

Крок 6. Редагуємо діаграму навантаження – насосна станція першого підйому працює 24 години на добу і подача води протягом доби є рівномірною.

Редактирование диаграммы нагрузки

Диаграмма нагрузки

Давление в водопроводе: 1 бар

Период

Число часов эксплуатации в день h/day

Рабочая точка	Расход	Q	Часы
1	<input type="text" value="100.0"/> %	610 м³/ч	<input type="text" value="24.0"/> h/day
2	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
3	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
4	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
5	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
6	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
7	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
8	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
9	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day
10	<input type="text"/> %	м³/ч	<input type="text" value="0"/> h/day

Крок 7. Вибираємо загальну кількість та число резервних насосів.

Общее кол-во насосов

Число резервных насосов

Требуется бак в напорной линии

Имеющийся бак в напорной трубе л

Диапазон Вкл/Выкл %

Крок 8. Вибираємо конструкцію насоса (чавун або неіржавіюча сталь) та тип з'єднання (фланець або різьба).

Крок 9. Задаємо умови експлуатації.

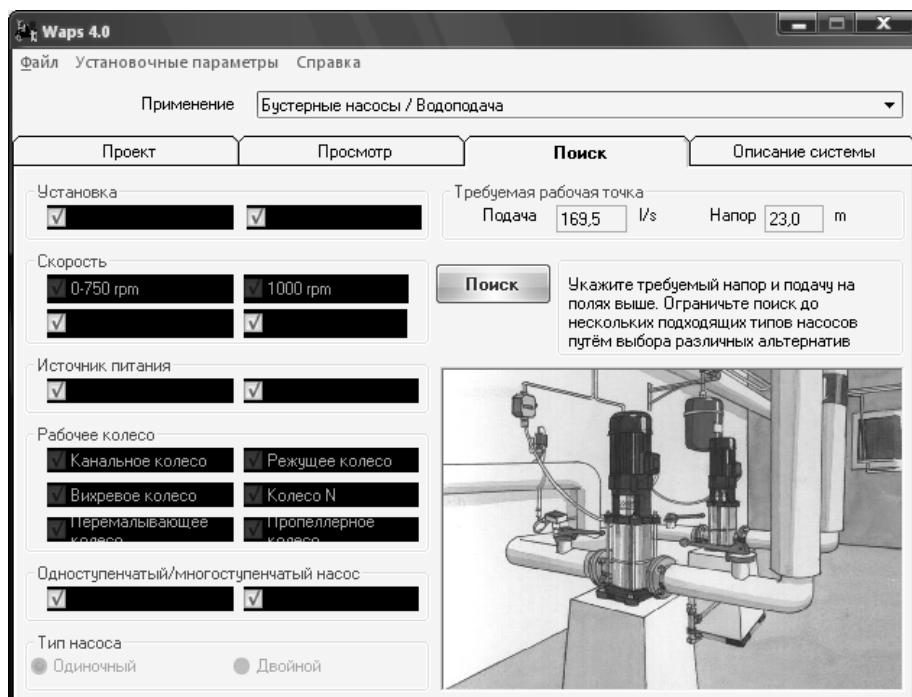
Условия эксплуатации	
Частота	<input checked="" type="radio"/> 50 <input type="radio"/> 60 Hz
Фаза	<input checked="" type="radio"/> 1 or 3 <input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 3
Пуск трехфазный	<input type="text"/>
Минимальная мощность для старта SD	5.5 кВт
Напряжение	1 x 230 или 3 x 400 V
Температура окружающей среды	20 °C
Макс. рабочее давление	10 бар

Крок 10. Після введення даних натискаємо кнопку “Начать подбор”.

Виробник рекомендує насосний агрегат марки TP 200-290/4 A-F-A-BQQE. На рис. 2 наведено графік сумісної роботи насосів на водогін. На графіку побудовано напірну характеристику насоса з необточеним колесом, а також графіки паралельної роботи двох та трьох насосних агрегатів. Залитим показано робоче поле паралельної роботи двох насосних агрегатів в діапазоні від необточенного рабочего колеса до обточки величиною 25%. Напірна характеристика, яка перетинається з характеристикою мережі у робочій точці має значення обточки рабочего колеса 4%. Технічні характеристики вибраних насосних агрегатів виведені на екран справа від графіка сумісної роботи.

Варіант 3. Виберемо насосний агрегат за допомогою програми Waps [3] від виробника Flygt. Послідовність роботи з програмою наступна.

Крок 1. У вікні програми вибираємо вкладку “Поиск”. Потім вибираємо область застосування насоса “Бустерные насосы/Водоподача”. Вводимо дані робочої точки, а саме: подача (169,5 л/с) та загальний напір (23 м).



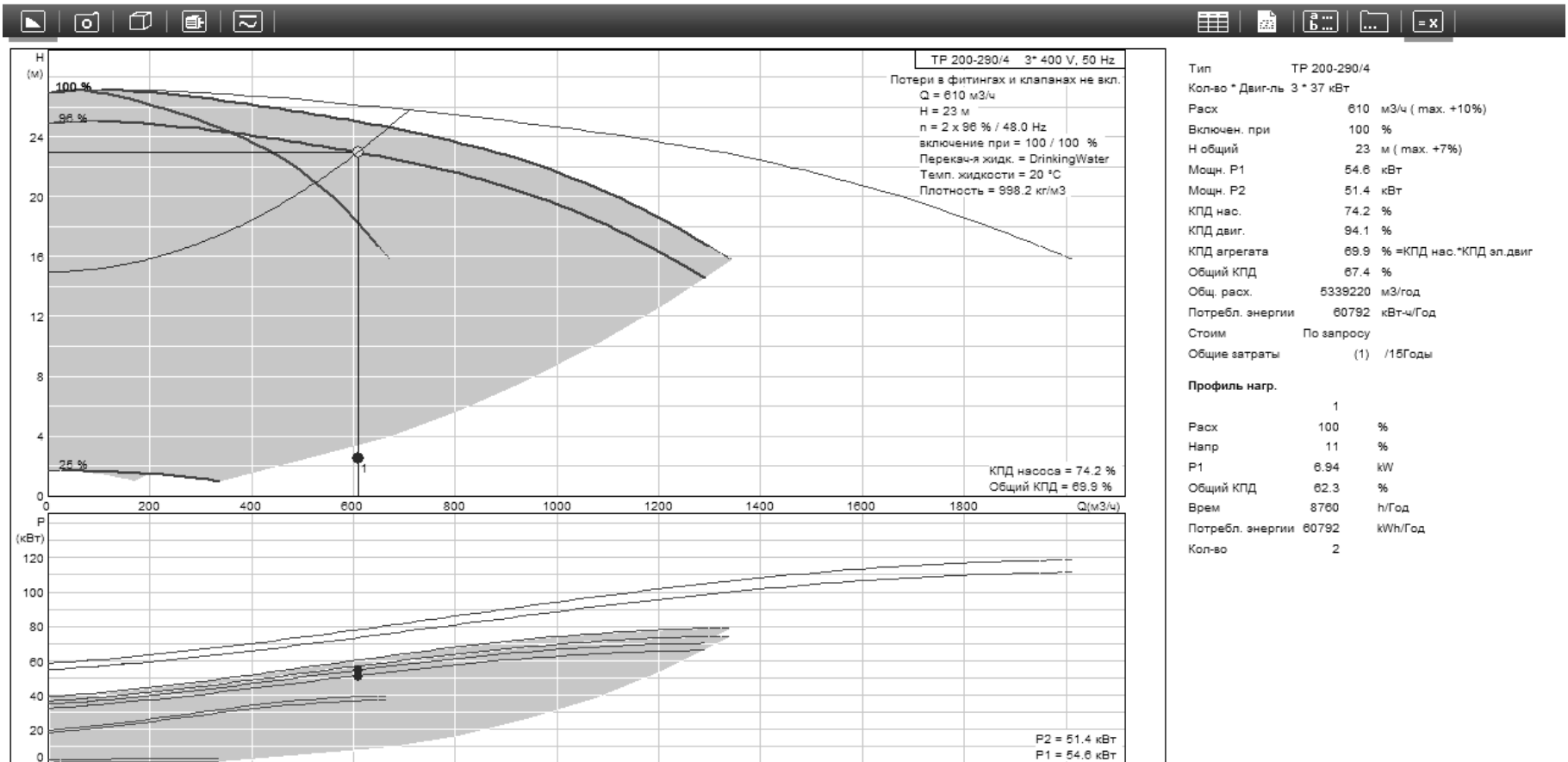
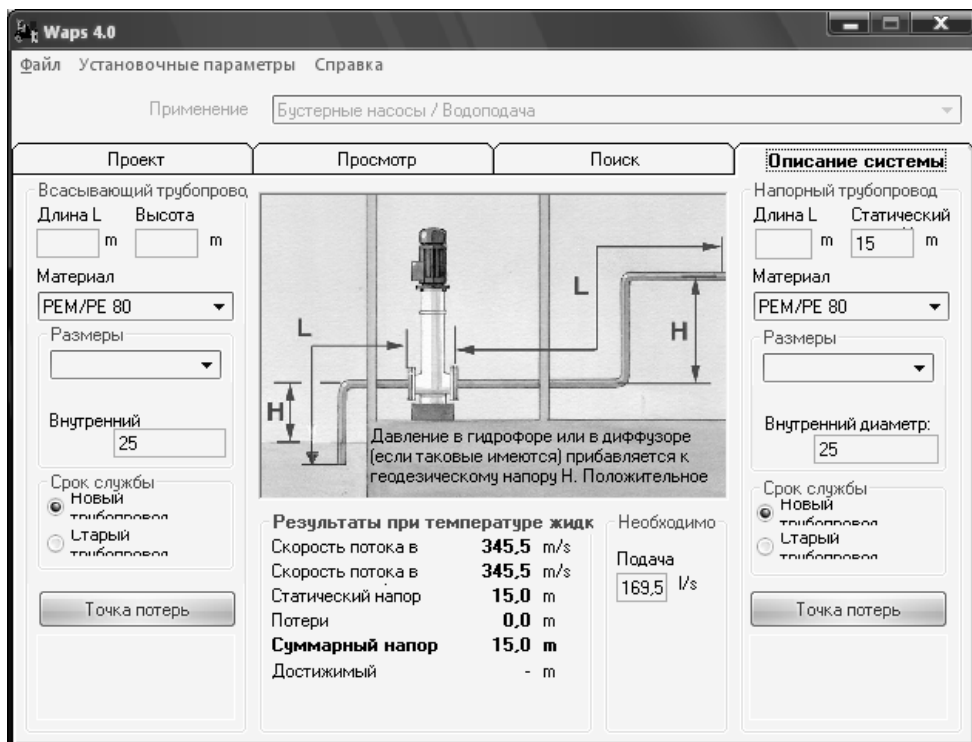


Рис. 2. Графік сумісної роботи насосів Grundfos на водогін

Крок 2. У вкладці “Описание системы” вводимо на напірному трубопроводі статичний напір (15 м).



Крок 3. Повертаємося на вкладку “Поиск” та натискаємо на кнопку “Поиск”. Програма вибрала насос марки AL 1250/4.

На рис. 3 наведено графіки напірної характеристики вибраного насоса з різною частотою обертання робочого колеса, а саме 50; 45; 40; 35 та 30 Гц. Технічні характеристики виводяться на екран з лівої сторони від графіка сумісної роботи. Недоліком даної програми є відсутність можливості підбору насосних агрегатів при паралельній роботі.

Розрахунки надійності виконуємо після розроблення обв'язки насосних агрегатів. Для насосних станцій другої категорії надійності показником, за яким виконується оцінювання надійності, прийнято стаціонарний коефіцієнт готовності K_r та протилежний йому коефіцієнт простою K_p . Для обчислення коефіцієнта готовності визначаємо напрацювання на відмову T та середній час відновлення T_v . Напрацювання на відмову розраховуємо за методом вкладів, а напрацювання на відмову, як середньозважену величину за вкладами елементів.

Створено систематизований ряд технологічних схем водопровідних насосних станцій [4], який дає змогу вибрати схему обв'язки насосних агрегатів при різній кількості робочих та резервних насосів. Для кожної схеми розроблені формули для обчислення показників безвідмовності та ремонтпридатності насосних станцій.

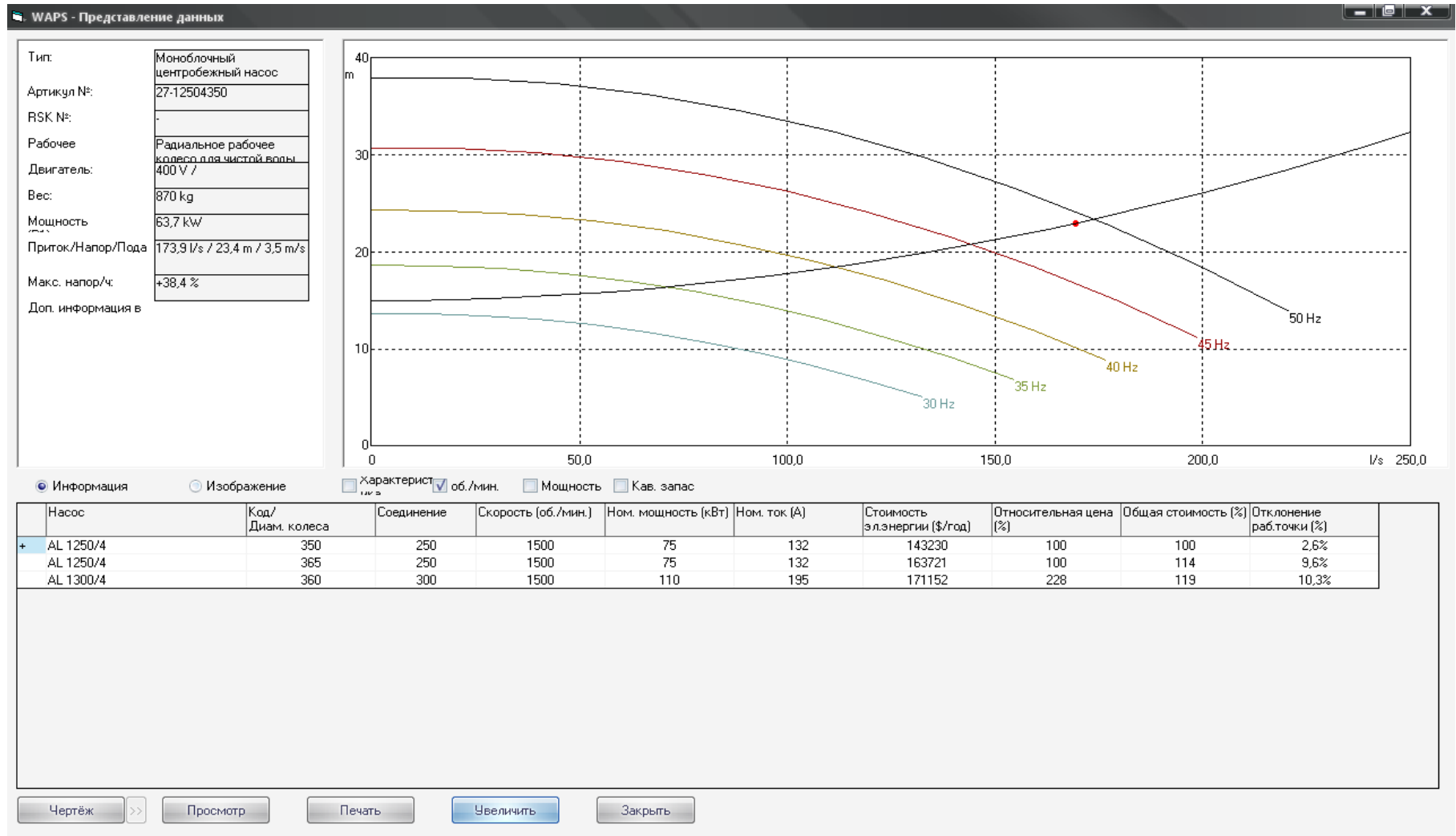


Рис. 3. Графік сумісної роботи насосів Flygt на водогін

Прийmemo, для прикладу, дві схеми обв'язки насосів (рис. 4, 5). Наведемо спочатку формули розрахунку безвідмовності та ремонтпридатності для технологічної схеми № 29 із систематизованого ряду (рис. 4).

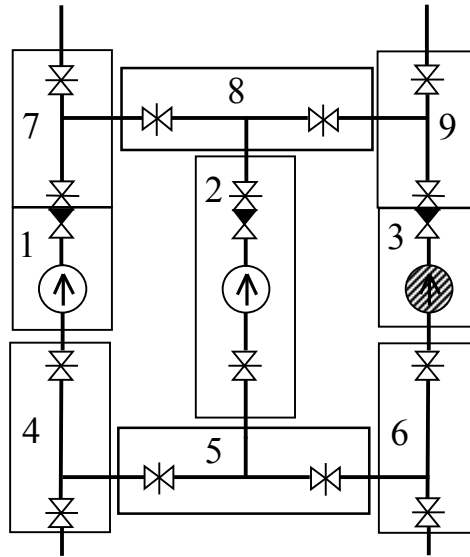


Рис. 4. Технологічна схема насосної станції №29

Параметр потоку відмов укрупнених елементів.

$$\omega_1 = \omega_3 = \omega_H + \omega_K; \quad \omega_2 = \omega_{ЗБ} + \omega_H + \omega_K + \omega_{ЗН}; \quad \omega_4 = \omega_6 = 2\omega_{ЗБ};$$

$$\omega_5 = 2\omega_{ЗБК}; \quad \omega_7 = \omega_9 = 2\omega_{ЗН}; \quad \omega_8 = 2\omega_{ЗНК}.$$

Вклади укрупнених елементів.

$$v_1 = \omega_1 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П6} + K_{П9}); \quad v_4 = \omega_4 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П6} + K_{П9});$$

$$v_2 = \omega_2 (K_{Л1} + K_{П3} + K_{П4} + K_{П6} + K_{П7} + K_{П9}); \quad v_5 = \omega_5;$$

$$v_6 = \omega_6 (K_{П1} + K_{П2} + K_{П4} + K_{П7}); \quad v_7 = \omega_7 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П6} + K_{Л9});$$

$$v_8 = \omega_8; \quad v_9 = \omega_9 (K_{П1} + K_{П2} + K_{П4} + K_{П7}).$$

Параметр потоку відмов насосної станції.

$$\omega_{НС} = v_1 + v_2 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9, \quad 1/\text{год.}$$

Напрацювання на відмову насосної станції.

$$\dot{O}_{ін} = \frac{1}{v_1 + v_2 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9}, \quad \text{ãîä.}$$

Середній час відновлення укрупнених елементів.

$$T_{B1} = T_{B3} = \frac{T_{BH} \omega_H + T_{BK} \omega_K}{\omega_H + \omega_K}; \quad T_{B4} = T_{B6} = T_{BЗБ}; \quad T_{B5} = T_{BЗБК};$$

$$T_{B2} = \frac{T_{BЗБ} \omega_{ЗБ} + T_{BH} \omega_H + T_{BK} \omega_K + T_{BЗН} \omega_{ЗН}}{\omega_{ЗБ} + \omega_H + \omega_K + \omega_{ЗН}};$$

$$T_{B7} = T_{B9} = T_{B_{3H}}; \quad T_{B8} = T_{B_{3HK}}.$$

Середній час відновлення працездатності насосної станції.

$$T_{B_{HC}} = \frac{v_1 T_{B1} + v_2 T_{B2} + v_4 T_{B4} + v_5 T_{B5} + v_6 T_{B6} + v_7 T_{B7} + v_8 T_{B8} + v_9 T_{B9}}{v_1 + v_2 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9}, \text{ год.}$$

$$\text{Коефіцієнт готовності насосної станції } K_{Г} = \frac{T_{HC}}{T_{HC} + T_{B_{HC}}}.$$

$$\text{Коефіцієнт простою насосної станції } K_{П} = 1 - K_{Г}.$$

Наведемо формули розрахунку показників безвідмовності та ремонтпридатності для технологічної схеми № 27 (рис. 5).

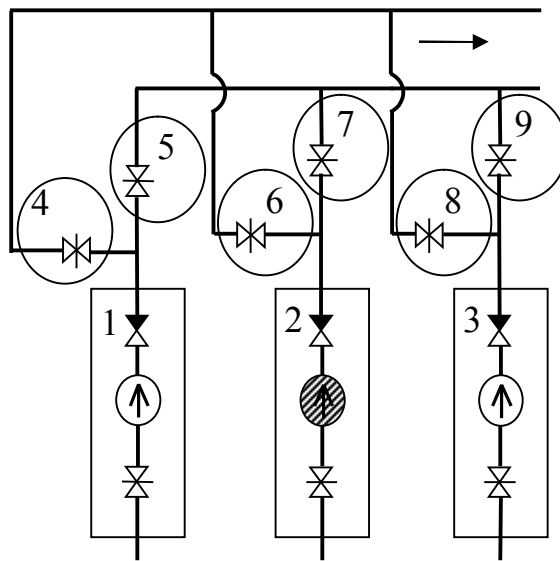


Рис. 5. Технологічна схема насосної станції №27

Параметр потоку відмов укрупнених елементів.

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_{3B} + \omega_{H} + \omega_{K}; \quad \omega_4 = \omega_5 = \omega_6 = \omega_7 = \omega_8 = \omega_9 = \omega_{3H}.$$

Вклади укрупнених елементів.

$$v_1 = \omega_1 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П6} + K_{П7} + K_{П8} + K_{П9});$$

$$v_3 = \omega_3 (K_{П1} + K_{П2} + K_{П4} + K_{П5} + K_{П6} + K_{П7});$$

$$v_4 = \omega_4 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П7} + K_{П9}); \quad v_5 = \omega_5 (K_{П2} + K_{П3} + K_{П6} + K_{П8});$$

$$v_6 = \omega_6 (K_{П1} + K_{П3} + K_{П5} + K_{П9}); \quad v_7 = \omega_7 (K_{П1} + K_{П3} + K_{П4} + K_{П8});$$

$$v_8 = \omega_8 (K_{П1} + K_{П2} + K_{П5} + K_{П7}); \quad v_9 = \omega_9 (K_{П1} + K_{П2} + K_{П4} + K_{П6}).$$

Параметр потоку відмов насосної станції.

$$\omega_{HC} = v_1 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9, \text{ 1/год.}$$

Напрацювання на відмову насосної станції.

$$T_{\text{НС}} = \frac{1}{v_1 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9}, \text{ год.}$$

Середній час відновлення працездатності укрупнених елементів.

$$T_{\text{В1}} = T_{\text{В2}} = T_{\text{В3}} = \frac{T_{\text{ВЗВ}} \omega_{\text{ЗВ}} + T_{\text{ВН}} \omega_{\text{Н}} + T_{\text{ВК}} \omega_{\text{К}}}{\omega_{\text{ЗВ}} + \omega_{\text{Н}} + \omega_{\text{К}}};$$

$$T_{\text{В4}} = T_{\text{В5}} = T_{\text{В6}} = T_{\text{В7}} = T_{\text{В8}} = T_{\text{В9}} = T_{\text{ВЗН}}.$$

Середній час відновлення працездатності насосної станції.

$$T_{\text{НС}} = \frac{v_1 T_{\text{В1}} + v_3 T_{\text{В3}} + v_4 T_{\text{В4}} + v_5 T_{\text{В5}} + v_6 T_{\text{В6}} + v_7 T_{\text{В7}} + v_8 T_{\text{В8}} + v_9 T_{\text{В9}}}{v_1 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9}, \text{ год.}$$

Коефіцієнт готовності насосної станції обчислюємо за вище наведеними формулами. Для автоматизації розрахунку надійності розроблено алгоритм та удосконалену блок-схему (рис. 6) програми розрахунку надійності. Програма складена мовою Turbo Pascal і дає змогу розрахувати надійність будь-якої схеми насосної станції із систематизованого ряду при різних показниках надійності елементів.

Надійність окремих елементів, які прийняті в розрахунках насосних станцій, наведено в таблиці 1. Надійність усіх насосних агрегатів прийнята однаковою.

Таблиця 1

Надійність елементів насосної станції

№ з/п	Елементи	Умовне позначення	Напрацювання на відмову T , год.	Параметр потоку відмов ω , 1/год·10 ⁻⁴	Середній час відновлення працездатності $T_{\text{в}}$, год.	Коефіцієнт простою елемента $K_{\text{п}}$
1	Насосні агрегати	н	3000	3,33	60,0	0,02
2	Зворотні клапани	к	7000	1,43	10,0	0,0014
3	Засувки:					
	- на всмоктувальних лініях	зв	8000	1,25	20,0	0,0025
	- на напірних лініях	зн	2500	4,0	10,0	0,004
	- на всмоктувальних колекторах	звк	8000	1,25	20,0	0,0025
	- на напірних колекторах	знк	8000	1,25	20,0	0,0025

Для роботи програми початковими даними є номер схеми у систематизованому ряді насосних станцій. Результати розрахунку надійності технологічної схеми №29 (рис. 4):

напрацювання на відмову $T = 1450,5$ годин; середній час відновлення $T_B = 21,1$ годин; коефіцієнт готовності $K_G = 0,9857$; коефіцієнт простою $K_{\Pi} = 0,0143$.

У берегових водозаборах суміщеного типу немає необхідності улаштування колектора на всмоктувальних лініях і всмоктувальні трубопроводи для кожного насосного агрегату працюють незалежно. Для порівняння розраховано надійність технологічної схеми № 27 із систематизованого ряду насосних станцій (рис. 5) при тих же показниках надійності елементів.

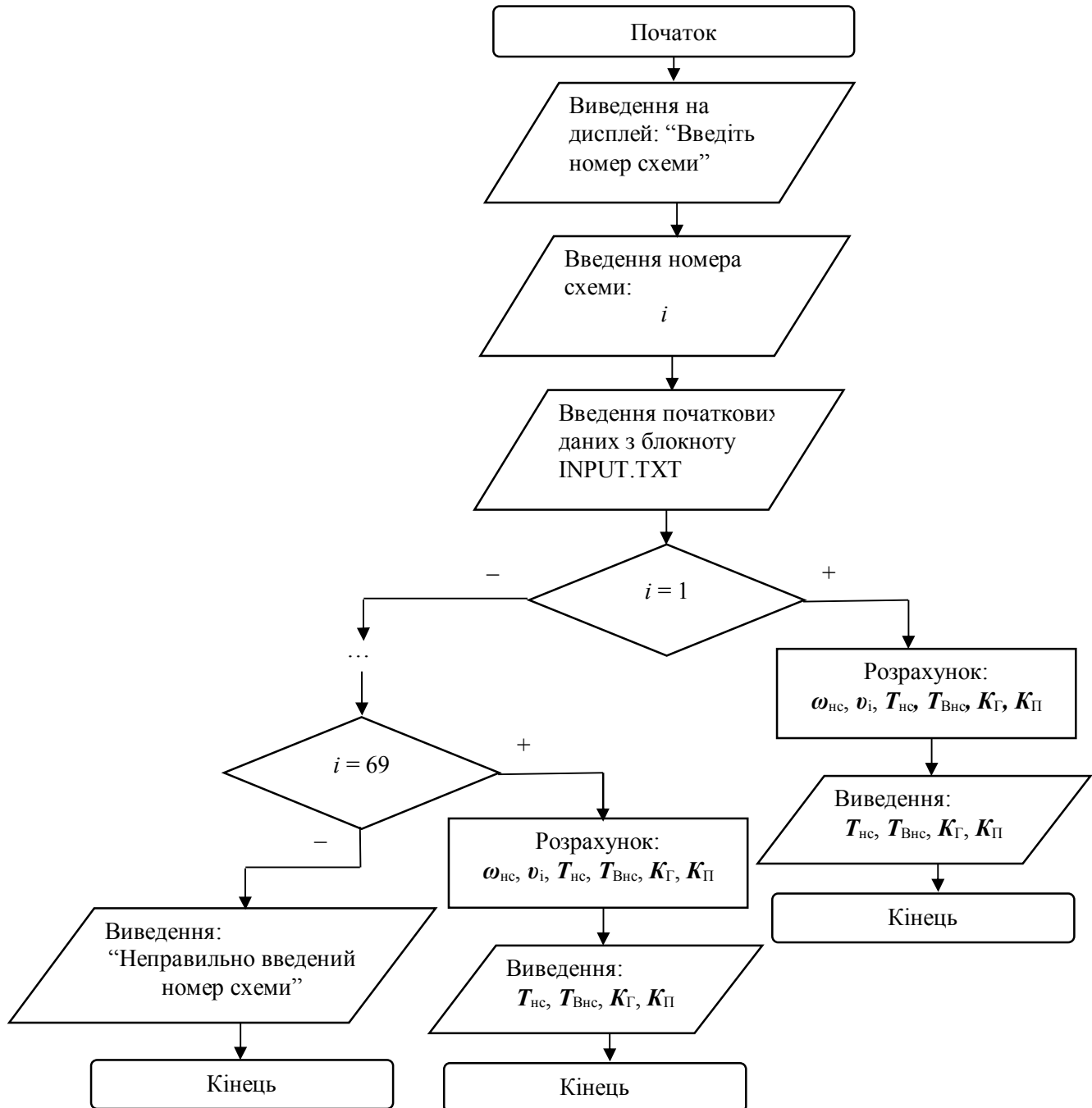


Рис. 6. Блок-схема програми розрахунку надійності

Результати розрахунку надійності насосної станції № 27 (рис. 5) наступні:

напрацювання на відмову $T = 4746,5$ годин; середній час відновлення $T_B = 20,8$ годин; коефіцієнт готовності $K_G = 0,9956$; коефіцієнт простою $K_{\Pi} = 0,0044$.

Надійність технологічної схеми № 27 (рис. 5) вища ніж надійність схеми № 29 (рис. 4) за рахунок незалежних всмоктувальних трубопроводів. Напрацювання на відмову більше в 3,3 рази, а коефіцієнт простою менший в 3,25 рази.

Висновок. Отже, на сьогодні доцільно автоматизувати два етапи процесу проектування насосних станцій – вибір насосів та розрахунок надійності технологічної схеми. На жаль, програмне забезпечення для вибору насосів створено тільки для деяких імпорتنих насосів.

Список літератури

1. <http://www.wilo-spb.ru/>
2. <http://net.grundfos.com/>
3. <http://www.flygt.ru/3288204.asp>.
4. *Новохатній В.Г.* Комп'ютерна програма розрахунку надійності насосних станцій / В.Г. Новохатній, С.О. Костенко // Тези 63-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 1. (Полтава, 10-19 травня 2011 р.) – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 188–189
5. *СНиП 2.04.02-84.* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.