

Н. И. Баранчикова, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Иркутского национального исследовательского технического университета  
С. П. Епифанов, канд. физ.-мат. наук, главный специалист ООО «Иркутский ремонтно-механический завод»

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОЛЬЦЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Ключевые слова: задача потокораспределения, напор, давление, нефиксированный отбор, насосный агрегат, гидравлические испытания, системы отопления, обратные системы водоснабжения

При испытании на герметичность гидравлических систем чаще выделяются тупиковые участки, в которых обеспечивается пробное давление в течение определенного времени. Но бывают случаи, когда испытаниям подвергаются кольцевые подсистемы, например подающий и обратный трубопровод первого контура системы теплоснабжения. При этом зафиксировать давление в одном из узлов системы не представляется возможным. В этом случае необходимо предварительно получить экспериментальным путем зависимость понижения статического напора от расхода, после чего решить задачу потокораспределения, решением которой является расход по системе и напор (давление) в любой точке системы. Приведен численный пример решения подобной задачи.

Существуют различные классификации задач потокораспределения (ЗП) в системах водо- и теплоснабжения [1, 2], среди которых можно выделить ЗП с фиксированными и нефиксированными отборами. В последнем случае отборы потребителей зависят от давления (пьезометрического напора) у потребителя, например при поступлении воды в резервуары или заборе воды из водозаборных скважин [3, 4]. Обязательным условием в таких задачах является фиксация напора хотя бы в одном из узлов системы (схемы), например отметка уровня воды в источнике или в резервуаре. Существуют также системы (и соответствующие им задачи потокораспределения), в которых отсутствуют отборы и притоки среды в систему. Это так называемые закрытые системы, такие как системы теплоснабжения (первый контур), двухконтурные системы отопления, циркуляционные системы. Т. к. чаще в них присутствует подпитка, иногда совсем незначительная, то в узле, где осуществляется подпитка, обычно устанавливается регулятор давления «после себя», поддерживающий требуемое давление, т. е. давление (напор) фиксируется в одном из узлов системы. В то же время существуют системы, в которых отсутствуют как притоки и отборы среды, так и фиксированное давление хотя бы в одном из узлов системы. К таким системам относятся системы отопления с независимым присоединением к тепловой сети без подпитки (теплоноситель – различные виды этиленгликоля).

При различных испытаниях трубопроводов, в т. ч. и на герметичность, возникает задача потокораспределения, в которой определение параметров потока представляет некоторую трудность. Так, если трубопровод закольцован, а насос для проведения испытаний включается при некотором давлении на всасывающем трубопроводе (статическом напоре), то как определить давление перед насосом после выхода его на номинальные обороты? Принято считать, что давление перед насосом остается неизменным, т. е. таким же, как и до пуска насосного агрегата. Однако эксперименты показывают, что давление перед насосным агрегатом после включения может как снижаться, так и повышаться, а в некоторых случаях может остаться прежним, равным гидростатическому давлению до включения насоса. Как определить аналитически, на какую величину изменится и от каких параметров зависит изменение давления перед насосом после его включения? Для ответа на эти вопросы рассмотрим схему гидравлической системы, которая представлена на рисунке.

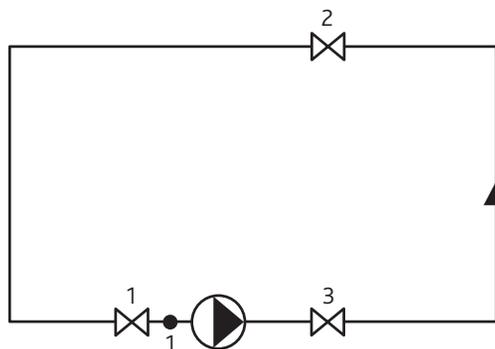


Схема первого контура системы теплоснабжения: 1 – узел перед насосом;  $\rightarrow$  – участок с указанием направления потока;  $\bullet$  – насосная станция;  $\times$  – участок с задвижкой

Такая схема встречается при наличии двух контуров в системах теплоснабжения (первый контур) и отопления (второй контур) и др.

Для определения расхода в системе достаточно решить всего одно алгебраическое уравнение

$$f(x) = f_n(x), \quad (1)$$

где  $f(x)$  – потери напора на участке трубопровода от напорного до всасывающего патрубков насоса, м;  $f_n(x)$  – напорно-расходная характеристика насоса;  $x$  – подача насоса.

Уравнение (1) отражает тот факт, что напор насоса в точности равен потере напора в системе. Часто  $f_n(x)$  в (1) – полином не выше второй степени, хотя возможна и более высокая степень, требующаяся для аппроксимации напорно-расходной характеристики насоса. Решение  $x$  уравнения (1) – единственно при соответствующих требованиях к функциям  $f$  и  $f_n$  [2]. Из (1) следует, что подача насоса не зависит от статического напора перед насосом.

Будем называть **понижением** разность между статическим напором и напором перед насосом после его включения (при установившемся режиме). Здесь можно провести некоторую аналогию с понижением уровня воды в скважине относительно статического напора при работе насоса в водозаборной скважине [5, 6]. Так, для определения динамического уровня в скважине требуется информация о свойствах водоносного пласта и работающих рядом скважинах, а также напорной характеристике насоса. Аналогично, чтобы определить давление (напор) перед насосом после его включения, необходимо получить предварительно (до решения ЗП) зависимость, например, понижения в узле 1 перед насосом от расхода по системе (подачи насоса).

Т. к. для замкнутой гидравлической системы уравнение баланса расходов превращается в тождество, то для нахождения напора (давления) перед насосом после его включения необходимо уравнение, связывающее понижение (в одном из узлов или в узле перед насосом по ходу движения воды) с параметрами системы.

В общем случае понижение, как показывают эксперименты, зависит от гидравлического сопротивления системы и параметров напорно-расходной характеристики насоса (напора насоса при нулевой подаче и подачи насоса). Записать эту зависимость в явном виде пока не представляется возможным. Но можно получить некоторую эмпирическую формулу (на основе экспериментальных данных), связывающую понижение в узле 1, например, с подачей или гидравлическим сопротивлением системы.

Тогда понижение  $\Delta H = \bar{H}_1 - H_1$  в узле 1 равно

$$\bar{H}_1 - H_1 = \varphi(x), \quad (2)$$

где  $\bar{H}_1$  – статический напор перед насосом (напор при выключенном насосе), м;  $H_1$  – напор перед насосом после его включения и выхода на установившийся режим, м;  $\varphi$  – экспериментально определяемая зависимость, линейная либо квадратичная, зависит неявно от гидравлического сопротивления системы, т. е. при изменении  $s$  меняется значение  $\varphi(x)$ .

Зависимость (2) корректна, т. к. подача насоса связана взаимно однозначной зависимостью с гидравлическим сопротивлением системы  $s$  (например, ветвь гиперболы,  $x = a \cdot s^\alpha$ ,  $\alpha \in [-2, \dots, -1]$ ). Зависимость  $\varphi(x)$  может быть линейной или квадратичной. Получить ее можно на основе экспериментов (минимально по трем режимам), измеряя подачу и напор перед насосом для каждого из режимов и высчитывая гидравлическое сопротивление системы. Поддачи предпочтительнее выбирать на границах рабочего диапазона напорной характеристики насоса и в его середине. Регулирование подачи осуществляется изменением гидравлического сопротивления системы регулирующим органом, расположенным достаточно близко к насосу со всасывающей стороны.

Рассмотрим схему экспериментальной установки, на которой выполнены измерения расхода и понижения при различных положениях регулирующего органа (см. рисунок). В системе установлен насос, напорная характеристика которого имеет вид  $H = 4,2 - 1,2x$ , м,  $x - \text{м}^3/\text{ч}$ . Длина трубопровода из пластика  $d = 20$  мм составляет 2,5 м. Результаты измерений приведены в таблице.

Перед всасывающим патрубком расположен пьезометр, по которому определялся статический уровень и напор после включения насоса, после чего вычислялось понижение  $\Delta H = \bar{H}_1 - H_1$  в узле 1. Плоскость сравнения проходит через ось насоса.

Чем ближе регулирующий орган к насосу со всасывающей стороны, тем больше диапазон изменения понижения.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

Потери напора в системе  $h$  равны напору насоса.

№	$\bar{H}_1$	$H_1$	$\Delta H$	$x$	$s$	$h$
1	0,90	0,933	-0,033	1,30	2,44	2,65
2		0,844	0,056	0,61	4,10	3,50
3		0,816	0,084	0,23	6,60	3,90
4		0,808	0,092	0,13	8,10	4,00
5		0,807	0,093	0,00	$\infty$	0,00

На основании результатов таблицы получены аппроксимации понижения от расхода по системе (подачи) и расхода от гидравлического сопротивления системы:

$$\Delta H = 0,1173 - 0,11x, \quad x \in [0; 1,3], \quad 0 \leq x \leq 1,3, \quad (3)$$

$$x = 4,9305s^{-1,5}$$

$$\text{либо } x = 1,3 + (s - 2,44)/(0,237 - 0,636s).$$

Из (3) можно определить расход (и гидравлическое сопротивление системы), при котором понижение в узле 1 будет равно нулю, – так называемая «нейтральная» точка системы. Понижение может быть отрицательной величиной, т. е.  $H_1 > \bar{H}_1$ , когда сопротивление системы минимальное (все регулирующие органы открыты). При расходе, близком к нулю, всегда  $H_1 < \bar{H}_1$  и понижение имеет наибольшее значение.

Таким образом, из (3) видно, что понижение с увеличением расхода уменьшается (при этом гидравлическое сопротивление системы увеличивается), в то время как для водозаборных скважин понижение уровня воды в скважине с увеличением дебита скважины всегда только увеличивается [6, 7].

С изменением частоты вращения рабочего колеса насоса кривая (3) опускается, если частота снижается, и наоборот, т. е. изменяется только свободный член в (3) пропорционально изменению напора насоса при нулевой подаче. Расход в нейтральной точке (точке системы, в которой  $\Delta H = 0$ ), когда она располагается в узле 1, для рассматриваемой системы равен  $1,07 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В общем случае при изменении гидравлического сопротивления системы нейтральная точка меняет свое положение.

Понижение зависит от места расположения регулирующего органа. Наибольшее понижение происходит при регулировании краном 1 (см. рисунок), меньше – краном 2, а при регулировании краном 3 понижения практически не происходит.

Зависимость (3) позволяет при заданном расходе в системе обеспечить требуемый напор (давление) в любой точке системы, меняя статический напор и гидравлическое сопротивление системы.

## Выводы

1. При испытании на герметичность кольцевых гидравлических систем, используя зависимость понижения в узле перед насосом от подачи, можно получить требуемое давление в произвольной точке системы, меняя статический напор и гидравлическое сопротивление системы либо частоту вращения электропривода.

2. При организации режима в закрытой системе отопления, используя предлагаемые зависимости понижения от подачи, можно обеспечить гидравлический режим таким образом, чтобы давление в критических точках системы было не ниже требуемого (заданного).

## Литература

1. Абрамов Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972.
2. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985.
3. Епифанов С. П., Зоркальцев В. И. Задача потоко-распределения с нефиксированными узловыми отборами // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 9. – С. 30–35.
4. Баранчикова Н. И., Бычкова Н. В., Епифанов С. П., Корельштейн Л. Б. Моделирование поступления воды в резервуары при гидравлическом расчете систем подачи и распределения воды // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018. – № 6. – С. 36–41.
5. Плотников Н. А., Алексеев В. С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990.
6. Старинский В. П., Михайлик Л. Г. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: Учеб. пособие. – Мн.: Вышэйшая школа, 1989.
7. Тугай А. М., Прокопчук И. Т. Водоснабжение из подземных источников. Справочник. – К.: Урожай, 1990.

# ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗДОРОВЫЕ ЗДАНИЯ



[zvt.abok.ru](http://zvt.abok.ru)

**Электронный ресурс**  
**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
№2-2021

- КОМФОРТНЫЙ КЛИМАТ В ТЕАТРАХ КАК РЕЗУЛЬТАТ ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА
- КОМПЛЕКСНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ НАБЫЛА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ДОМОВ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ
- ПЕРВАЯ ШКОЛА БЕЗ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В КАНАДЕ

В ТЮМЕНИ БУДЕТ ПОСТРОЕН ПЕРВЫЙ ДОМ УРОВНЯ EXCELLENT СОГЛАСНО МЕТОДОЛОГИИ BREEAM

**Электронный ресурс**  
**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
№1-2021

- СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ВЛАДЕЛЬЦАМИ НЕДВИЖИМОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МУЛЬТИЭТАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ – РЕЗУЛЬТАТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОНАЛИ
- МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МЕДИЦИНСКОГО КОЛЛЕКЦИОННИКА НА ОБЪЕКТАХ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

УМНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗДОРОВОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

**Электронный ресурс**  
**ЗДАНИЯ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
№3-2020

- ЗДАНИЯ, КОТОРЫЕ ПОМОГАЮТ НАМ ВЕСТИ ЗДОРОВЫЙ ОБРАЗ ЖИЗНИ: НОВЫЙ СТАНДАРТ «ЗДОРОВОЙ СРЕДЫ» FITWEL
- КОММЕРЧЕСКОЕ ЗДАНИЕ В ПЕРИОД ПАНДЕМИИ И ВЫХОДА ИЗ НЕЕ – КОМФОРТ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЗДОРОВЬЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ

TROTEC  
ИЗМЕРЕНИЯ, ДОСТУПНЫЕ КАЖДОМУ