

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 621.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-67-75

## Оценка возможности реализации автономного электроснабжения от гидрогенератора применительно к системам диспетчеризации объектов жилищно-коммунального хозяйства

Г.Г. Ильин

В настоящее время идет активное развитие городской застройки, диктующее новые требования к инфраструктуре водоснабжения и водоотведения, направленные на повышение надежности и соответствия жестким требованиям экологических стандартов. Ключевыми задачами являются диспетчерский контроль и управление сетями водоснабжения. Проблема реализации подобных систем заключается в сложности организации электропитания применяемого оборудования, обычно обеспечиваемого за счет аккумуляторных батарей, что налагает необходимость периодического обслуживания, и тем самым повышает стоимость их эксплуатации. Решение данного вопроса — применение автономного источника электроэнергии, в качестве которого предложено использование энергии потока воды в трубопроводе.

Выполнена оценка возможности создания автономной системы диспетчеризации объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) на базе гидрогенератора. Исследование проведено путем анализа гидравлических параметров байпасного трубопровода, установленного на трубопроводы больших диаметров. Для определения величин скорости потока и давления в байпасном трубопроводе смоделирован поток жидкости. Результаты моделирования и их последующий анализ позволили рассчитать диапазон генерируемой мощности гидрогенератора и оценить возможность создания автономной системы диспетчеризации.

*Ключевые слова:* моделирование водного потока, гидрогенератор, автономная система диспетчеризации, городская система водоснабжения.

*Для цитирования:* Ильин Г.Г. Оценка возможности реализации автономного электроснабжения от гидрогенератора применительно к системам диспетчеризации объектов жилищно-коммунального хозяйства // Вестник МЭИ. 2020. № 6. С. 67—75. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-67-75.

## Evaluating the Possibility to Implement Autonomous Power Supply from a Hydrogenerator as Applied to Dispatching Systems for Housing and Utility Services

G.G. Ilyin

Currently, we are witnessing active development of urban building construction, which dictates new requirements for the infrastructure of water supply and sanitation. These requirements are aimed at improving the reliability and compliance with stringent environmental standards. Dispatch supervision and control of water supply networks are among the key tasks that have to be solved under such conditions. The problem of implementing such systems lies in difficulty of setting up power supply to the equipment used in these systems. The power supply of such systems is as a rule provided by using storage batteries, which entails the need for periodic maintenance of these systems and thereby increases the cost of their operation. The problem can be solved by using an autonomous source of electricity. The energy of the water flow in the pipeline is proposed to be used as such source.

The possibility of setting up an autonomous dispatch control system for housing and utility services based on a hydrogenerator is estimated. The study is carried out by analyzing the hydraulic parameters of a bypass pipeline installed on a large-diameter pipeline. To determine the flow velocity and pressure in the bypass pipeline, the fluid flow is modeled in it. The modeling results and their subsequent analysis made it possible to calculate the range of power produced by the hydrogenerator and estimate the possibility of setting up an autonomous dispatch control system.

*Key words:* water flow modeling; hydrogenerator; autonomous dispatch control system; urban water supply system.

*For citation:* Ilyin G.G. Evaluating the Possibility to Implement Autonomous Power Supply from a Hydrogenerator as Applied to Dispatching Systems for Housing and Utility Services. Bulletin of MPEI. 2020;6:67—75. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-6-67-75.

## Введение

По мере развития городской инфраструктуры необходимость удаленного контроля объектов разветвленной системы водоснабжения все более востребована, в связи с чем растет спрос на их реализацию.

Основное направление разрабатываемых систем диспетчеризации направлено на контроль параметров и управление водопроводных сетей с целью уменьшения аварийных ситуаций и контроля качества воды.

Большинство перечисленных объектов удалены от инфраструктуры или труднодоступны для подвода и организации электропитания, и для систем диспетчеризации целесообразны автономные источники электроэнергии. В их качестве выступают: энергия потока воды в трубопроводе [1 — 3], энергия механических вибраций трубопровода [4, 5], тепловая энергия [6, 7].

Системы диспетчеризации строят на основе мало-мощного телекоммуникационного оборудования, и для организации электропитания предложена установка гидрогенераторов малой мощности в трубопроводы.

Техническое решение по установке гидротурбин предполагает два вида сборки: монтаж непосредственно в трубопровод на основной поток воды и размещение в качестве монтажно-демонтажной вставки в байпасный трубопровод, на котором формируется байпасный поток. Каждый из предложенных методов имеет свои достоинства и недостатки.

Оценена возможность создания автономной системы диспетчеризации объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) на базе гидрогенератора, встроенного в байпасный трубопровод.

## Оценка мощности системы диспетчеризации сетей водоснабжения

В настоящее время системы диспетчеризации систем водоснабжения работают за счет внешнего электропитания или аккумуляторных батарей. Периодичность замены батареи определяется ее емкостью и частотой работы измерительного, контроллерного и телекоммуникационного оборудования. С целью увеличения срока службы системы снижается частота передачи данных, что приводит к несвоевременной реакции диспетчера при возникновении аварийных ситуаций.

Потребность в электрической мощности системы можно оценить, исходя из реального примера реализации диспетчеризации водопроводных сетей. Система состоит из следующего оборудования:

— шкафа диспетчеризации, в который входят модем (8,4 Вт) и контроллер с модулями дискретного и аналогового вводов (10 Вт);

— датчиков давления (3 шт. по 6 Вт), температуры (6 Вт), затопления камеры, несанкционированного проникновения (4,8 Вт).

В общей совокупности потребность в электрической мощности при напряжении питания 24В — 50 Вт.

Указанная величина принята в качестве оценочной мощности для вынесения решения о возможности создания автономной системы диспетчеризации.

## Исходные данные объектов жилищно-коммунального хозяйства крупной городской агломерации

Для моделирования потока жидкости в трубопроводе необходимо знать геометрию объекта, скорость, давление, температуру жидкости.

Геометрия объекта определяется диаметрами трубопроводов и необходима для задания области расчета модели.

Скорость и давление нужны для задания граничных условий и начальных параметров моделирования течения жидкости. Исходные данные представлены в табл. 1.

## Моделирование потока жидкости на участке трубопровода с байпасной врезкой

Моделирование потока жидкости в байпасной трубе (рис.1) выполнено в CFD-программе (Flow Vision, Autodesk CFD, SigmaFlow, ANSYS FLUENT и др). Алгоритмы моделирования для всех программ похожи и состоят из нескольких основных шагов.

### Шаг 1. Задание области расчета.

Под областью расчета понимают объем, в котором определены уравнения математической модели, и граница объема, на которой определены граничные условия (ГУ). Область расчета создается вне программного CFD-комплекса в системах САПР.

После задания геометрии расчетной области в САПР она сохраняется в форматах \*.VRML или \*.STL и загружается в CFD-пакет.

### Шаг 2. Выбор математической модели движения жидкости.

Для вычисления движения воды по трубопроводу взята модель «ламинарного несжимаемого течения», служащая для моделирования движения крови в сосудах или воды в трубопроводах. Ее ограничения включают медленное течение при малых изменениях плотности, малые числа Рейнольдса и Маха.

### Шаг 3. Задание граничных условий.

Для расчета применены три типа граничных условий (рис. 2):

— ГУ «Стенка» задает параметры моделируемой границы типа «твердая стенка», нет протекания;

— ГУ «Вход», ГУ «Выход» — входная и выходная границы потока;

Температура воды неизменна и равна 0°C.

### Шаг 4. Генерация расчетной сетки.

Для детального расчета и анализа сложных расчетных областей можно менять (подстраивать) сетку под геометрию моделируемого объекта. Пример задания начальной расчетной сетки приведен на рис. 3.

Таблица 1

Исходные данные объектов ЖКХ

Наименование объекта	Расход (диапазон), м <sup>3</sup> /ч		Давление, м вод. ст		Диаметр трубопроводов, мм	
	min	max	min	max	min	max
РВУ № 1	5,25	1 846	17,6	54,6	900	1400
РВУ № 2	464	4309	8,3	40,2	900	2000
РВУ № 3	201	1146	4,7	47,7	1000	1400
РВУ № 4	100	895	15,3	54,3	600	1400
РВУ № 5	1478	5410	4,2	49,7	600	1400
РВУ № 6	27,5	3074	15,1	36,9	1000	1400
РВУ № 7	468	4120,8	7,6	39,9	600	1600
НС № 1	—	—	—	13,1	900	1000
НС №2	137,5	1352,5	—	13,9	900	1000
ВК № 1	1440	3600	—	40	400	1200
ВК № 2	1800	3600	42	47	400	1200
РВУ № 8	73	229	30,6	35,6	300	400
РВУ № 9	—	—	54,5	58,9	150	400
ВК № 3	270	3600	25	30	200	900

Примечание: РВУ — регулирующий водопроводный узел; НС — насосная станция; ВК — водопроводная камера. Данные публикуются на условиях ограниченного раскрытия информации объектами ЖКХ

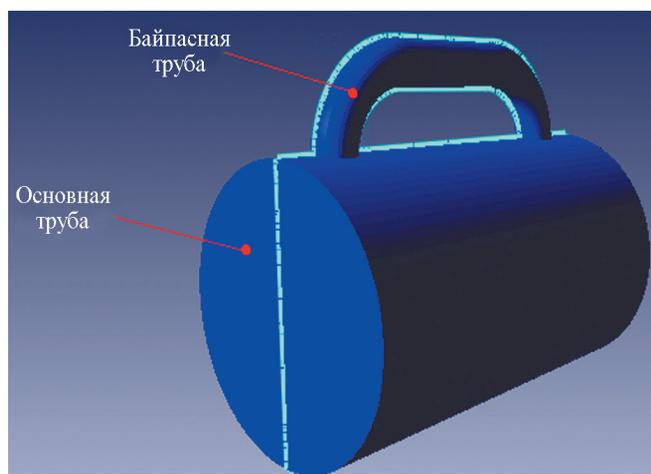


Рис. 1. Схема трубопровода городской системы водоснабжения со встроенной байпасной трубой



Рис. 2. Граничные условия расчетной модели

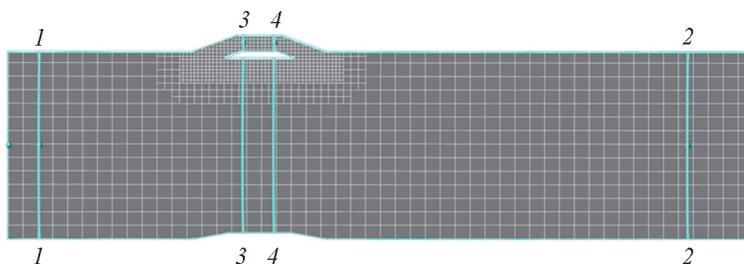


Рис. 3. Заданная расчетная сетка модели

*Шаг 5. Задание параметров метода численного моделирования.*

Для моделирования потока жидкости в трубопроводе оставлены по умолчанию: метод — 2-й порядок точности, итерации — 2000, точность — 0,01.

*Шаг 6. Просмотр результатов моделирования.*

На рисунках 4, 5 продемонстрированы результаты моделирования распределения давления в трубопроводе в установившемся режиме (значения давлений даны относительно опорного давления  $P_{\text{оп}} = 41188$  Па или 4,2 м вод. ст.). На рисунке 6 изображено распределение скорости потока в трубопроводе. Для удобства результаты визуализированы в виде цветовой заливки по давлению и скорости (каждому цвету соответствует свое числовое значение зависимости от давления (Па) и скорости (м/с)).

**Результаты моделирования потока воды в байпасном трубопроводе, установленном на основной водовод.**

Исследование проводили с целью определения минимального и максимального значений давления и скорости в байпасе для каждого объекта, представленного в табл. 1. Для поиска минимального значения течение воды моделировали с минимальными давлением и скоростью на участке трубопровода максимального диаметра. Максимальное значение получено при максимальных давлении и скорости потока на минимальном диаметре трубопровода.

В таблице 2 даны результаты моделирования потока воды в байпасном трубопроводе диаметром 100 мм (графа «Параметры байпасного трубопровода»).

Полученные максимальные (РВУ № 1) и минимальные значения (РВУ № 3) позволяют рассчитать диапазон генерируемых мощностей генератора.

### Расчет мощности, вырабатываемой гидротурбиной

Расчет мощности принят на основании следующих допущений:

— есть точка, когда погруженная в поток гидротурбина не оказывает на него никакого влияния — «точка свободного вращения генератора» ( $H_1$ , рис. 7, а), расход при этом максимальный ( $Q_1$ , рис. 7);

— имеется точка, где турбина создает максимальное препятствие для прохода потока в трубопроводе — «точка заторможенного генератора» ( $H_3$ , рис. 7, а), расход равен 0;

— характеристика изменения напора от расхода между точками  $H_1$  и  $H_3$  принята линейной.

Мощность генератора в точках  $H_1$  и  $H_3$  — 0. Площадь подграфика между точками 0 —  $Q_1$  —  $H_1$  — 0 является мощностью потока, протекающего в байпасе без какого-либо влияния турбины. Площадь подграфика  $H_1$  —  $Q_2$  —  $H_2$  —  $H_1$  представляет собой полезную мощность, вырабатываемую генератором. Максимальная мощность генератора достигается в точке  $H_2$  при расходе  $Q_2$ .

Мощность, вырабатываемая гидротурбиной, рассчитана по формуле:

$$P = \rho g Q (H_3 - H_1) \frac{(Q_1 - Q)}{Q_1}, \quad (1)$$

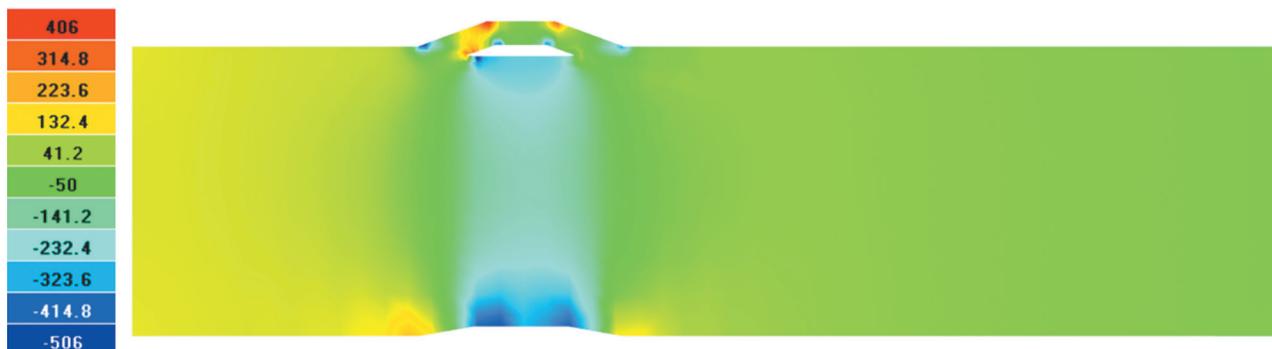


Рис. 4. Распределение давления в плоскости симметрии трубы

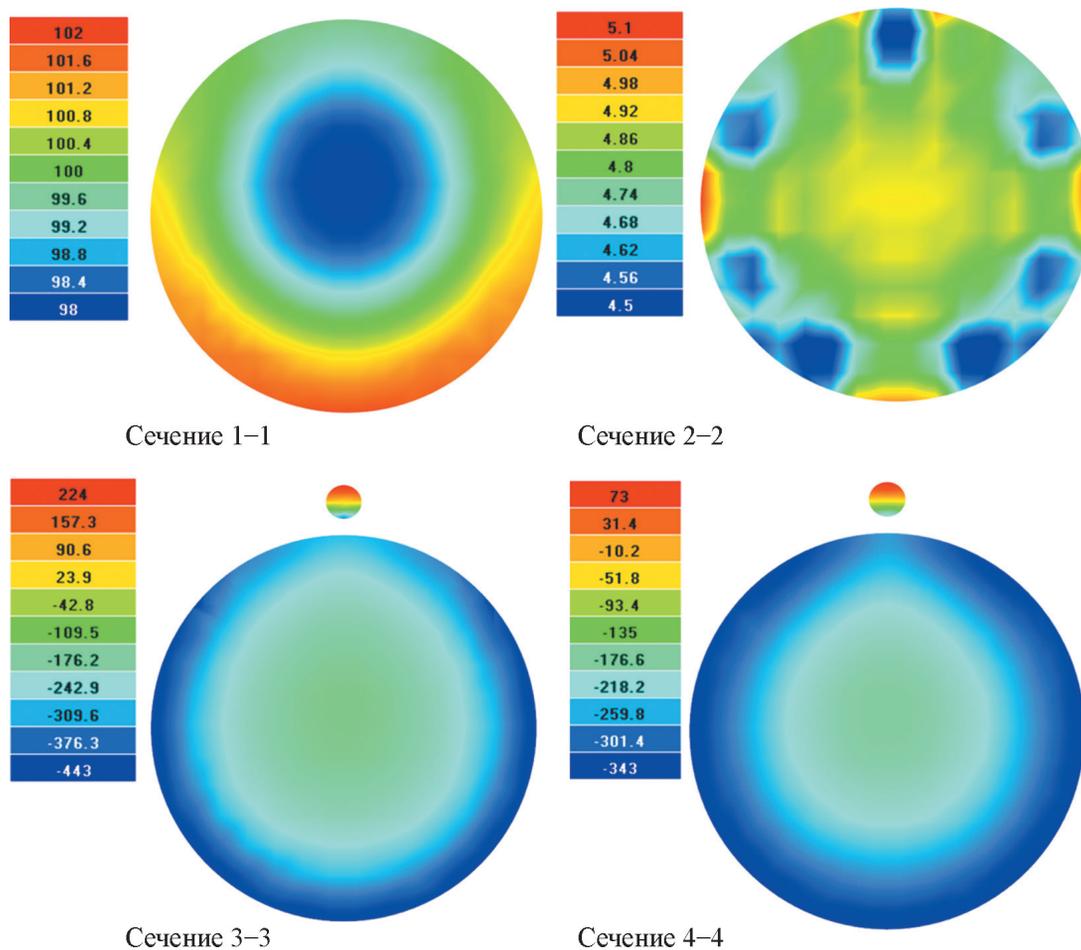


Рис. 5. Распределение давления в плоскости сечения трубы (точки сечения показаны на рис. 3)

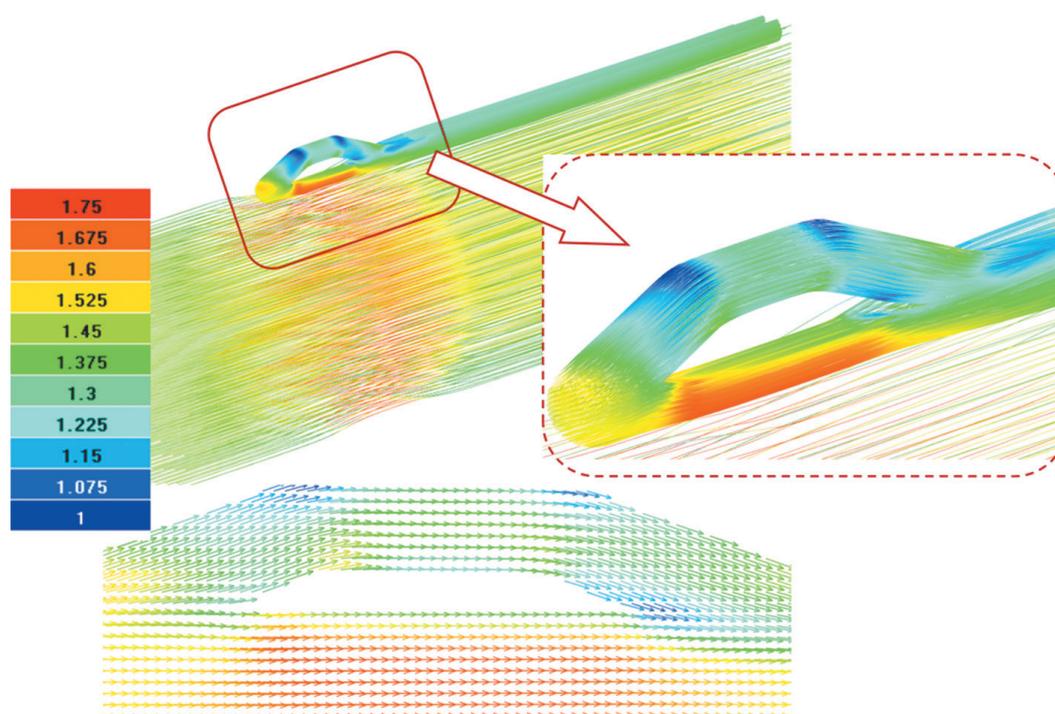


Рис. 6. Распределение скорости в плоскости симметрии байпасной трубы

## Результаты моделирования потока воды в байпасном трубопроводе

Наименование объекта	Параметры трубопровода				Давление, м вод. ст.			
	Давление, м вод. ст.		Диаметр трубопроводов, мм		Давление, м вод.ст.		Скорость водяного потока, м/с	
	min	max	min	max	min	max	min	max
РВУ № 1	17,6	54,6	900	1400	2,85	5,68	2,51	15,59
РВУ № 2	8,3	40,2	900	2000	1,35	2,93	1,19	8,03
РВУ № 3	4,7	47,7	1000	1400	0,68	4,96	0,6	13,62
РВУ № 4	15,3	54,3	600	1400	3,71	5,65	3,28	15,5
РВУ № 5	4,2	49,7	600	1400	1,02	5,17	0,9	14,19
РВУ № 6	15,1	36,9	1000	1400	2,2	3,84	1,94	10,54
РВУ № 7	7,6	39,9	600	1600	1,85	3,63	1,63	9,97
НС № 1	—	13,1	900	1000	—	0,97	—	2,67
НС № 2	—	13,9	900	1000	—	1	—	2,83
ВК № 1	—	40	400	1200	—	3,57	—	9,79
ВК № 2	42	47	400	1200	4,92	5,73	11,5	13,5

Примечание: РВУ — регулирующий водопроводный узел; НС — насосная станция; ВК — водопроводная камера

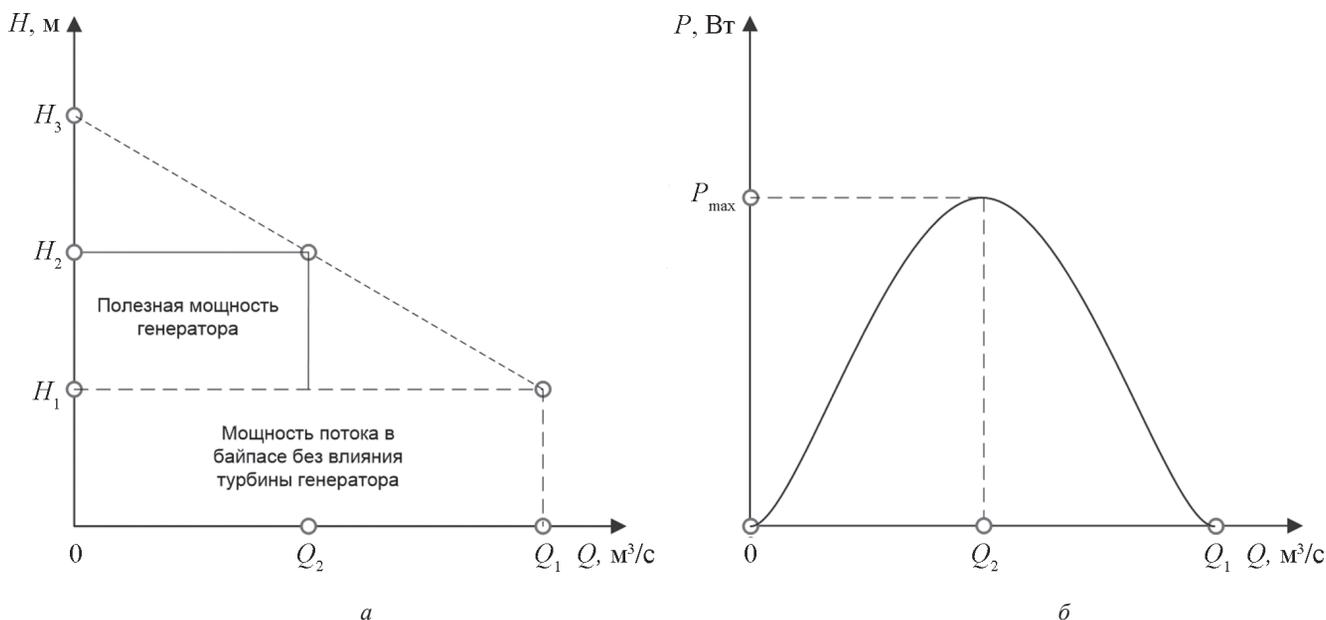


Рис. 7. Графики распределения напора  $H$  (а) и мощности  $P$  (б) в зависимости от расхода  $Q$

где  $p$  — плотность воды,  $p = 999,972 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $Q$  — расход воды, протекающей через байпас,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_1$  — максимальный расход воды в байпасе,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H_3$  — напор при «заторможенном» генераторе, м;  $H_1$  — напор при «свободном вращении» генератора, м.

С учетом допущения о непрерывности потока в байпасной трубе расход воды выглядит следующим образом:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} W, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр байпасного трубопровода, м;  $W$  — скорость потока в байпасе, м/с.

Точки  $Q_1$ ,  $H_1$  известны как промоделированные значения скорости и потока байпаса (табл. 2). Точка  $H_3$  получена при моделировании трубопровода с «закупоренным» байпасом, т. е. имитирован некий затор в байпасном трубопроводе, полностью препятствующий протеканию в нем воды.

Для объекта с максимальными параметрами по давлению (РВУ № 1) напор  $H_3 = 14 \text{ м вод. ст.}$ , а для объекта с минимальными параметрами по давлению (РВУ № 3) он составляет  $1,3 \text{ м вод. ст.}$

Максимальная и минимальная генерируемые мощности гидротурбины вычислены по параметрам в байпасе (см табл. 2) при помощи формул (1), (2). Результаты расчета даны на рис. 8, а, б.

Исходя из данных рис. 8 и максимальных значений, диапазон генерируемых мощностей равен 7...2500 Вт. Значения генерируемой мощности для всех остальных объектов, приведенных в табл. 2, располагаются в данном диапазоне.

**Оценка влияния сужения основного трубопровода и сечения байпаса на мощность потока в байпасной трубе**

Для оценки влияния сужения основного трубопровода и величины сечения байпаса на мощность проведены дополнительные моделирования. На рисунках 9, 10 показаны трехмерные диаграммы распределения: максимально возможной мощности потока на участке трубопровода диаметром 900 мм с максимальным давлением на входе, равным 54,6 м вод.ст.

(рис. 9, РВУ № 3 из табл. 2) и минимальной генерируемой мощности (рис. 10, РВУ № 1 из табл. 2).

Указанные диаграммы демонстрируют рост генерируемой мощности при увеличении процента сужения основного водовода и сечения байпасной трубы, это связано с тем, что при увеличении процента сужения основного трубопровода повышается избыточное давление в байпасе и, соответственно, скорость потока, а при расширении сечения байпаса растет расход жидкости. Мощность вычислена при помощи формул (1), (2).

Оценивая результаты моделирования и учитывая величину потребляемой мощности системы диспетчеризации, можно сделать вывод о возможности создания автономного источника электропитания системы диспетчеризации.

Данные, описанные в табл. 2, позволяют рассчитать рабочие режимы различных типов гидротурбин и оценить номинальные скорости вращения рабочего колеса. Диаграммы рис. 9, 10 помогают определить величину номинальной мощности генератора в диапазоне от 2 до 5000 Вт.

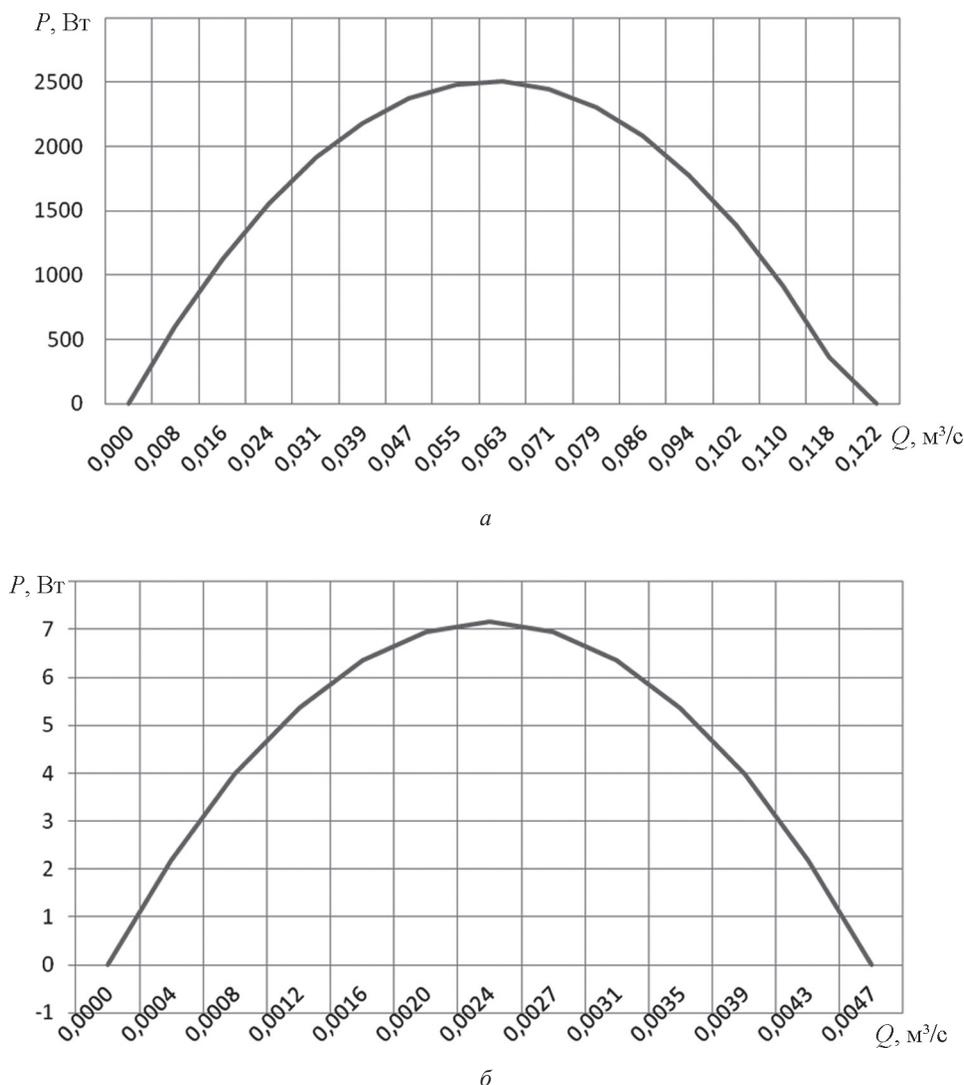


Рис. 8. Графики распределения мощности P в зависимости от расхода Q для РВУ № 1 (а) и РВУ № 3 (б)

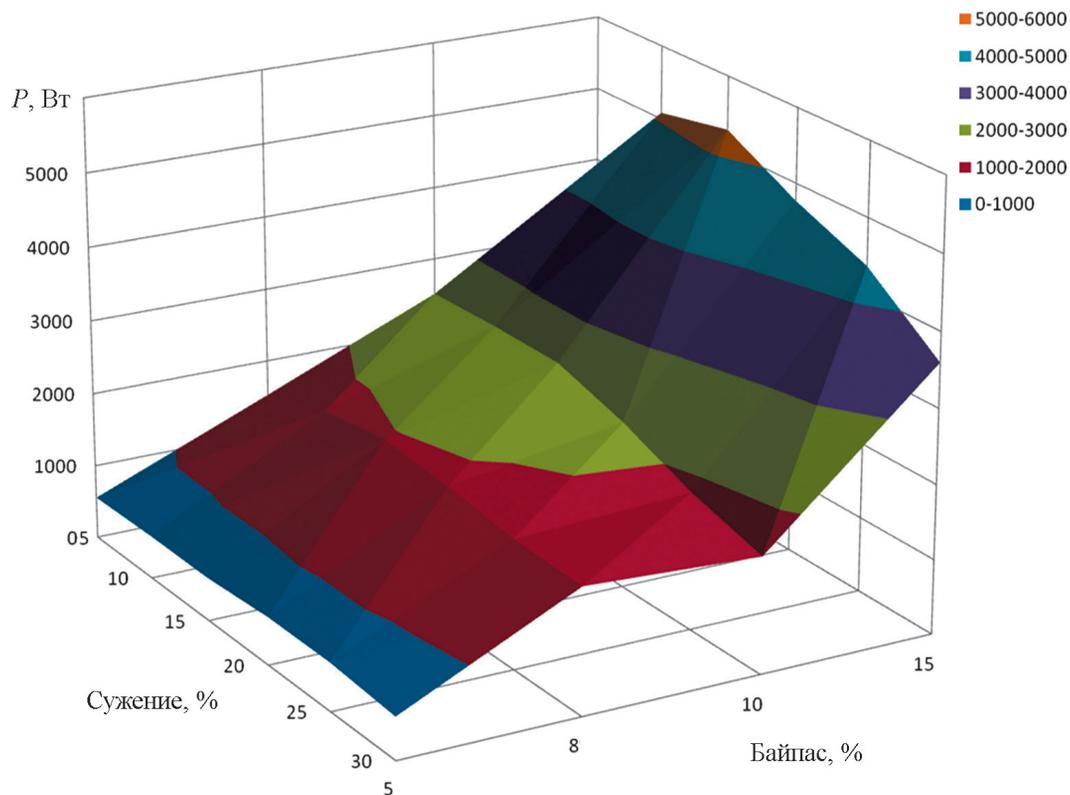


Рис. 9. Распределение максимально возможной генерируемой мощности от величины сужения основного трубопровода и сечения байпаса при диаметре трубопровода  $d = 900$  мм и давлении  $P = 54,6$  м вод. ст.

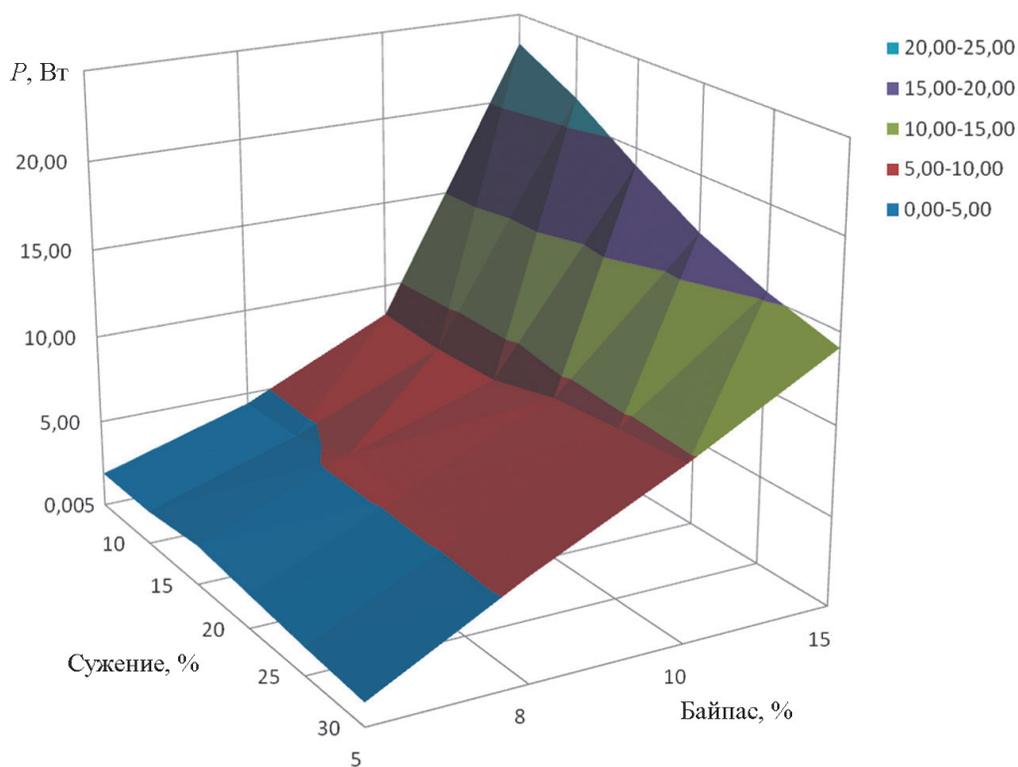


Рис. 10. Распределение минимальной генерируемой мощности от величины сужения основного трубопровода и сечения байпаса при диаметре трубопровода  $d = 1400$  мм и давлении  $P = 4,7$  м вод. ст.

### Заключение

Выполнено моделирование потока воды в байпасном трубопроводе, установленном на основном водоводе, с целью определения давления и скорости потока жидкости для оценки диапазона генерируемой мощности. Результат моделирования (см. табл. 2) для байпаса диаметром 100 мм позволил оценить максимальное и минимальное значения мощности (7...2500 Вт). Получены диапазоны рабочих давлений (0,68...5,73 м вод.ст.) и скоростей потока (0,6...15,9 м/с).

Для более детального определения величины генерируемой мощности проведено моделирование при

различных сужениях основного водовода и сечениях байпаса. Результаты представлены в виде трехмерных графиков максимально возможного (см. рис. 9) и минимального (см. рис. 10) распределений мощности в зависимости от процентов сужения и диаметра байпаса, отнесенного к диаметру основного трубопровода. Уточнены диапазоны минимальной (2 Вт) и максимальной (5000 Вт) генерируемых мощностей.

При анализе результатов моделирования вынесена положительная оценка о возможности создания автономного электропитания системы диспетчеризации водопроводных сетей.

### Литература

1. **Casini M.** Harvesting Energy from In-pipe Hydro Systems at Urban and Building Scale // Intern. J. Smart Grid and Clean Energy. 2015. V. 4 (4). Pp. 316—327.
2. **Hoffmann D. e. a.** Energy Harvesting from Fluid Flow in Water Pipelines for Smart Metering Applications // J. Physics: Conf. Series. 2013. V. 476. P. 012104.
3. **Андреев П.** Гидроэлектростанция в системе городского водопровода // Энергетика и промышленность России. Новые технологии. 2017. № 20 (328). С. 34.
4. **Зибров В.А., Тряпичкин С.А., Соколовская О.В.** Пьезогенератор в устройстве структурного мониторинга водопроводных сетей // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. С. 57—65.
5. **Сапронов А.А., Зибров В.А., Занина И.А., Соколовская О.В., Тряпичкин С.А.** Пьезоэлектрический генератор в устройстве мониторинга водопровода // Энергоснабжение и водоподготовка. 2012. № 5 (79). С. 42—44.
6. **Шостаковский П.** Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств // Компоненты и технологии. Блоки питания. 2015. № 1. С. 92—97.
7. **Виноградов В.С., Халыков К.Р.** Использование термоэлектрических генераторов в судовых энергетических установках, как устройств прямого преобразования тепловой энергии в электрическую // Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология». 2014. № 4. С. 48—56.

### Сведения об авторе:

**Ильин Георгий Геннадьевич** — аспирант кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», Инженер-проектировщик ООО «АКВА+», Москва, e-mail: gilin@aqua.plus.ru

### Information about author:

**Pyin Georgiy G.** — Ph.D.-student of Electric Drives Dept., NRU MPEI, Design Engineer of LLC «AQUA+LLC», e-mail: gilin@aqua.plus.ru

Статья поступила в редакцию: 06.02.2020

The article received to the editor: 06.02.2020

### References

1. **Casini M.** Harvesting Energy from In-pipe Hydro Systems at Urban and Building Scale. Intern. J. Smart Grid and Clean Energy. 2015;4 (4):316—327.
2. **Hoffmann D. e. a.** Energy Harvesting from Fluid Flow in Water Pipelines for Smart Metering Applications. J. Physics: Conf. Series. 2013;476:012104.
3. **Andreev P.** Hidroelektrostantsiya v Sisteme Gorodskogo Vodoprovoda. Energetika i Promyshlennost' Rossii. Novye Tekhnologii. 2017;20 (328):34. (in Russian).
4. **Zibrov V.A., Tryapichkin S.A., Sokolovskaya O.V.** P'ezogenerator v Ustroystve Strukturnogo Monitoringa Vodoprovodnykh Setey. Inzhenernyy Vestnik Dona. 2013;4:57—65. (in Russian).
5. **Sapronov A.A., Zibrov V.A., Zanina I.A., Sokolovskaya O.V., Tryapichkin S.A.** P'ezoelektricheskiy Generator v Ustroystve Monitoringa Vodoprovoda. Energosnabzhenie i Vodopodgotovka. 2012;5 (79):42—44. (in Russian).
6. **Shostakovskiy P.** Sovremennyye Termoelektricheskie Istochniki Pitaniya Elektronnykh Ustroystv. Komponenty i Tekhnologii. Bloki Pitaniya. 2015;1:92—97. (in Russian).
7. **Vinogradov V.S., Khalykov K.R.** Ispol'zovanie Termoelektricheskikh Generatorov v Sudovykh Energeticheskikh Ustanovkakh, kak Ustroystv Pryamogo Preobrazovaniya Teplovoy Energii v Elektricheskuyu. Vestnik AGTU. Seriya «Morskaya Tekhnika i Tekhnologiya». 2014;4:48—56. (in Russian).