

Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов Water supply, sewage, water conservation construction systems

Научная статья
УДК 628.25 628.12
DOI: 10.14529/build240306

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В КАНАЛИЗАЦИОННЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ

П.В. Сперанский, pavel.speranskiy@mail.ru
Н.Г. Сорокина, sorokinang@susu.ru
С.П. Сперанский, sam.speranskiy@mail.ru
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В современной практике проектирования сетей инженерно-технического обеспечения широкую популярность получили нагнетатели с преобразователями частоты. Позволяя в теории решать широкий спектр инженерно-технических задач, на практике, однако, такие нагнетатели зачастую оказываются применены неверно, что сводит на нет любые их преимущества. В первую очередь это затрагивает системы водоотведения. Являясь ключевым потребителем энергии, канализационные насосные станции по сей день комплектуются стандартными насосами без преобразователей частоты, работающими принципиально в том же режиме, в котором они работали и полвека назад. При этом существующие попытки внедрения преобразователей частоты в канализационные насосные станции показывают неоднозначные результаты, что значительно тормозит развитие этой области и ставит под вопрос общую целесообразность таких способов автоматизации. Для решения этой задачи и определения экономического эффекта от применения преобразователей частоты на сетях канализации в рамках данной работы рассмотрены физические основы регулирования канализационных насосных станций. Установлена принципиальная возможность экономии потребляемой электроэнергии. Составлена авторская методика количественного расчета экономической эффективности, учитывающая реальный режим работы канализационных насосных станций и технические особенности применяемых агрегатов.

Ключевые слова: методика расчета экономической эффективности, преобразователь частоты, канализационная насосная станция, производительность, неравномерность потребления, мощность, КПД

Для цитирования. Сперанский П.В., Сорокина Н.Г., Сперанский С.П. Методика расчета экономической эффективности внедрения преобразователей частоты в канализационных насосных станциях // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 3. С. 60–72. DOI: 10.14529/build240306

Original article
DOI: 10.14529/build240306

A METHOD FOR MEASURING THE ECONOMIC EFFICIENCY OF USING A FREQUENCY CONVERTER IN SEWAGE PUMP PLANTS

P. V. Speranskiy, pavel.speranskiy@mail.ru
N. G. Sorokina, sorokinang@susu.ru
S. P. Speranskiy, sam.speranskiy@mail.ru
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Frequency converters have gained in popularity over the last few decades and are widely used in many modern engineering lines. While the introduction of frequency converters in pumping installations theoretically allows for a simple solution to wide range of technical-engineering problems, in reality, these devices are often misused, negating the possible benefits. The problem is particularly acute in sewage line design. Being a major consumer of energy,

© Сперанский П.В., Сорокина Н.Г., Сперанский С.П., 2024.

sewage pump plants are equipped with ordinary pump units with no frequency converters, essentially working the same way they did half a century ago. Rare cases of such implementations show mixed results, further slowing the development of this area, and questioning the viability of frequency converters. In order to solve this problem and measure their economic efficiency, the physical parameters of the automatic control of sewage pump plants have to be established. According to the study, the power required can be reduced, and based on the proposed algorithm a method for calculating savings has been developed. The method takes into account the behavior of actual pump plants and the technicalities of pump units, thus providing for the versatility and thoroughness of its application.

Keywords: calculation method for measuring economic efficiency, frequency converter, sewage pump unit, volumetric flow rate, irregular flow rate, required power, coefficient of efficiency

For citation. Speranskiy P.V., Sorokina N.G., Speranskiy S.P. A method for measuring the economic efficiency of using a frequency converter in sewage pump plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(3):60–72. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240306

Введение

Нагнетательные установки, повсеместно распространенные на сетях инженерно-технического обеспечения, традиционно являются одним из крупнейших потребителей энергии (как правило, электрической), и потому представляют особый интерес с точки зрения повышения совокупной энергетической эффективности систем.

Для наиболее широко распространенных в строительстве нагнетателей, работающих на постоянных оборотах, вопрос обеспечения энергоэффективности решается в процессе «прямой» задачи гидроаэродинамического расчета инженерных сетей. Результатом расчета является подбор такого агрегата, для которого в рабочей точке было бы обеспечено наибольшее значение коэффициента полезного действия (КПД) η_a , %. При этом нетрудно заметить, что при условии неизменной по времени величины характеристики сопротивления сети $R(Q)$ и сопутствующем постоянном значении полезной мощности на перемещение рабочей среды $P_{\text{пол}}$, кВт, наибольшее значение КПД в рабочей точке будет в силу простого соотношения (1) гарантировать наименьшее значение потребляемой установкой нагнетателя мощности P_1 , кВт, и, как следствие, наивысшую энергетическую эффективность:

$$P_1 = P_{\text{пол}} \cdot \eta_a. \quad (1)$$

На практике, однако, характеристика сопротивления никогда не является величиной постоянной $R(Q)' \neq 0$. Связано это с тем, что применяемые в рамках решения инженерных задач расчетные параметры являются искусственной статистической величиной, и в системах, где фактические параметры непрерывно изменяются под действием случайных процессов, их разница компенсируется комплектом контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА). Наиболее распространенный в строительстве метод регулирования изменением характеристики сети хотя и позволяет поддерживать гидравлическую устойчивость систем, ведет к неизбежному росту потерь на преодоление введенных гидроаэродинамических сопротивле-

ний ξ , снижению КПД нагнетателей и общему снижению эффективности систем.

Во избежание падения энергоэффективности в ходе процессов регулирования в современной практике обрели популярность установки с преобразователями частоты (ПЧ) тока f , Гц [1–3]. Выполняя свою прямую задачу по обеспечению рабочих параметров системы, они поддерживают минимальное необходимое значение мощности P_1 , на всем протяжении жизненного цикла системы. Достигается это посредством регулирования частоты вращения рабочего колеса n , об/мин, что позволяет нагнетателю работать на такой характеристике $H(Q)$, которая обеспечивает требуемую производительность Q , м³/ч, при минимальном достаточном напоре H , м.

Несмотря на высокие показатели энергоэффективности установок с преобразователями частоты, их применимость ограничивается системами, требующими регулирования. В системах, технологические особенности которых не требуют поддержания рабочих параметров, предпочтение по-прежнему отдается стандартным установкам. В частности, в канализационных насосных станциях (КНС), являющихся ключевым потребителем электроэнергии на системах водоотведения [4] подбор насоса ведется исходя из соображений как можно более быстрой откачки стоков из приемного резервуара во избежание выпадения и загнивания осадка, а также освобождения рабочего объема резервуара для приема пиковых расходов. Неравномерность поступления стоков при этом компенсируется регулировочным резервуаром, а запуск насосов осуществляется по датчикам уровня [5].

Дешевизна такого решения и общая неприхотливость данных систем привели к тому, что применение ПЧ в КНС не нашло должного отражения в технической литературе [6, 7]. Своды правил по системам канализации также не дают никаких указаний или рекомендаций на этот счет [8, 9].

Между тем в последние годы производители преобразователей частоты активно продвигаются их применение в КНС. Предлагаемые способы, однако, зачастую не имеют под собой научного

обоснования и не могут быть использованы в инженерных расчетах.

В то же время практические примеры внедрения ПЧ в канализационных насосных станциях демонстрируют противоречивые результаты: от существенной (в десятки процентов) экономии потребляемой мощности P_1 до практически полного отсутствия экономического эффекта. Все это порождает серьезные дискуссии в профессиональном сообществе, для решения которых был принят ряд попыток дать количественную оценку экономического эффекта от внедрения ПЧ.

Так, в рамках одного из способов повышения энергетической эффективности предлагается методика, основанная на поддержании максимального уровня стоков в приемном резервуаре. При таком подходе снижение потребляемой насосом электроэнергии происходит за счет уменьшения геометрической высоты подъема жидкости ΔH_r , м. В соответствующей статье автором предлагается рассчитывать экономический эффект по простой формуле

$$EFF = \frac{Q(h_{\max} - h_{\text{ср}})}{367}, \quad (2)$$

где EFF – ориентировочная экономия электроэнергии, кВт; Q – действительный расход, м³/ч; 367 – переводной коэффициент; h_{\max} – максимально допустимый уровень стоков в приемном резервуаре КНС, м; $h_{\text{ср}}$ – средний уровень стоков в приемном резервуаре рассматриваемой канализационной насосной станции до установки частотного преобразователя, м.

Приведенная методика, однако, имеет ряд существенных недостатков, в частности, не учитывая снижение КПД насоса при смещении рабочей точки вправо от оптимального значения (рис. 1), на которое изначально подбирается любой насос, в силу чего ожидаемое по формуле (2) снижение мощности за счет уменьшения напора H , м, может быть частично или полностью перекрыто снижением КПД.

Помимо этого, методикой не принимается во внимание изменение расхода Q при соответствующем изменении геометрической высоты подъема жидкости (см. рис. 1), что вносит дополнительную погрешность в расчет. Необходимо также отметить, что смещение рабочей точки вправо может

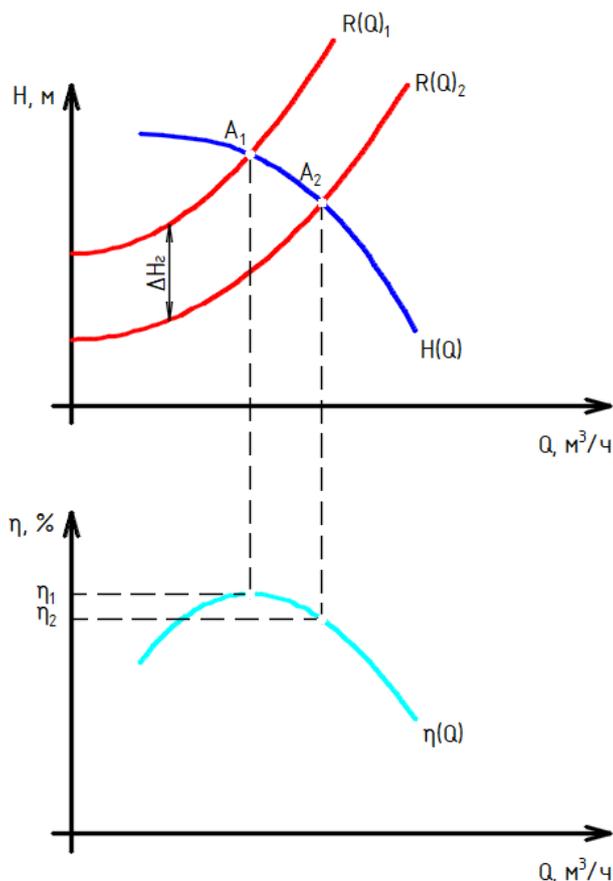


Рис. 1. Смещение КПД при изменении геометрической высоты подъема:
 $R(Q)_1$ – характеристика сети при среднем уровне стоков $h_{\text{ср}}$;
 $R(Q)_2$ – характеристика сети при максимальном уровне стоков h_{\max} ;
 A_1 – рабочая точка насоса при $h_{\text{ср}}$; A_2 – рабочая точка насоса при h_{\max} ;
 η_1 – КПД насоса в рабочей точке A_1 ; η_2 – КПД насоса в рабочей точке A_2

привести к перегрузке электродвигателя, повышению вибраций, кавитации. Дополнительно поддержание резервуара в постоянно заполненном состоянии неизбежно приведет к накоплению и загниванию осадка в часы минимальных и нулевых притоков и сведет на нет его накопительную функцию. В работе [10] авторы также указывают на недопустимость поддержания максимального уровня, предлагая при этом оценивать целесообразность применения ПЧ исходя из поддержания минимального уровня.

В этом случае снижение потребляемой мощности осуществляется посредством регулирования производительности Q насоса в соответствии с почасовым графиком притока сточных вод [11]. При таком подходе в часы минимального притока сточных вод насос работает на минимальных оборотах $n_{\text{мин}}$, об/мин, которые с увеличением притока возрастают вплоть до номинального значения n_n , об/мин, при максимальном часовом поступлении.

Технически такой способ регулирования реализуется установкой датчика уровня в приемном резервуаре и настройкой в контроллере минимального уровня стоков в качестве поддерживаемого значения. Таким образом, в каждый момент времени $\tau, \text{ч}$, подача насоса соответствует притоку сточных вод в КНС. При отсутствии притока уровень снижается ниже минимального значения, и во избежание сухого хода насос автоматически отключается.

Для определения экономического эффекта от подобного способа регулирования в ряде источников [12] предлагается рассчитывать потребляемую мощность при регулировании насоса от номинального расхода Q_n , м³/ч (согласно паспортным данным), до фактического среднего значения расхода $Q_{\text{ср}}$, м³/ч (по данным оператора конкретной КНС), за счет изменения числа оборотов n . Для этого определяется энергопотребление электродвигателя P при регулировании расхода с помощью преобразователя частоты по формуле

$$P = \frac{P_n}{\left(\frac{Q_n}{Q_{\text{ср}}}\right)^3}, \quad (3)$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

Рассчитываемое по формуле (3) значение потребляемой мощности P , затем предлагается сравнить с потребляемой насосом мощностью при регулировании расхода путем закрытия задвижки.

Между тем беглый анализ позволяет выявить существенные недостатки предложенной методики:

- в расчет принята номинальная мощность двигателя P_n вместо реально потребляемой в рабочей точке;

- кубическое снижение потребляемой мощности характерно только для замкнутых циркуляционных систем с нулевой статической составляю-

щей напора насоса. Подавляющее большинство КНС имеют геометрическую высоту подъема стоков. Далее авторами будет показано, что экономия мощности уменьшается с ростом доли геометрической высоты подъема жидкости в общем значении напора насоса, в пределе до нуля. Соответствующие выводы представлены и в работе [13];

- не учтены пределы регулирования с учетом минимально допустимой скорости движения стоков в напорных системах канализации [8];

- в работе не упоминается снижение КПД системы за счет потерь в ПЧ, не учитываются затраты на замену или подготовку электродвигателей для работы от ПЧ и т. п.

В итоге декларируемая авторами экономия электроэнергии от внедрения ПЧ в канализационных насосных станциях в 25–50 % является существенно завышенной и характерной только для узкого перечня частных случаев.

Существуют и более тривиальные способы повышения эффективности КНС посредством внедрения преобразователей частоты. В практике проектирования нередки случаи, когда на объектах устанавливаются насосы с существенно завышенными параметрами, что приводит к необходимости прикрытия запорной арматуры для снижения производительности до расчетного значения Q_p , м³/ч (рис. 2) и уменьшения числа пусков/остановок насосов. В этом случае частотное регулирование дает мгновенный эффект экономии потребляемой мощности ΔP_1 , кВт, за счет снижения параметров насосов без увеличения сопротивления сети (см. рис. 2).

Другим примером получения экономического эффекта от внедрения ПЧ в КНС может служить снижение числа аварийных ситуаций на изношенных сетях благодаря уменьшению давления и гидродаров за счет плавного пуска [14].

Оба этих случая хотя и демонстрируют возможность получения экономического эффекта от внедрения ПЧ в КНС, могут быть более рационально решены правильным подбором оборудования [15], проектированием и эксплуатацией сетей, а потому в рамках данной работы не могут являться аргументом в пользу экономического потенциала внедрения ПЧ.

Помимо этого, высказываются и соображения применения ПЧ с целью обеспечения равномерной подачи стоков на очистку. Хотя для нормальной работы очистных сооружений действительно требуется подача стоков с постоянным расходом, необходимо понимать, что большинство КНС не подают стоки напрямую на очистку, а только поднимают их на более высокую геодезическую отметку. В связи с этим такое обоснование применения ПЧ подходит только для редких частных случаев, когда КНС подает жидкость на очистные сооружения, на которых по каким-то причинам отсутствует усреднитель.

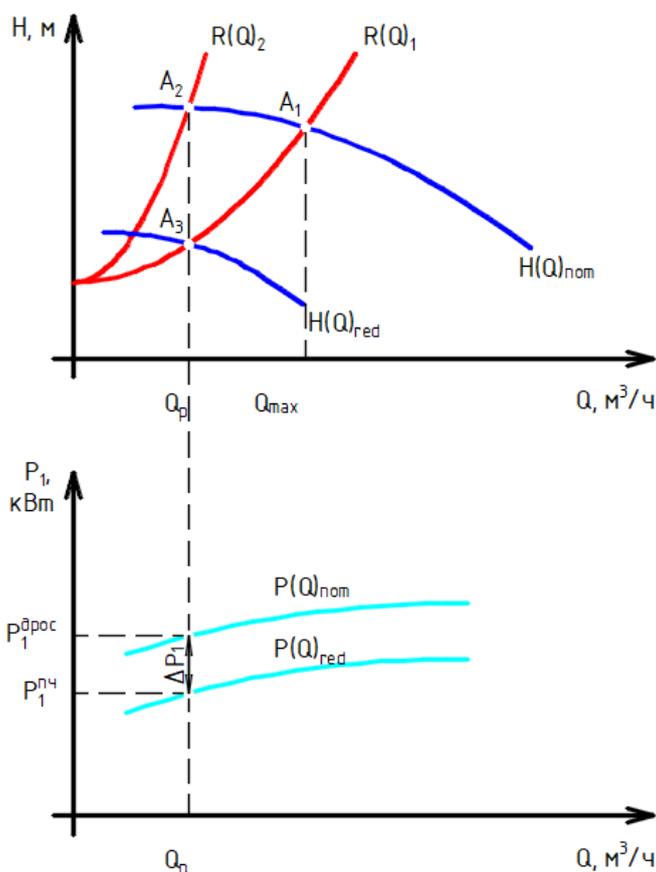


Рис. 2. Способы регулирования производительности:
 $R(Q)_1$ – расчетная характеристика сети; $R(Q)_2$ – характеристика сети при дросселировании; $H(Q)_{nom}$ – характеристика насоса при номинальных оборотах; $H(Q)_{red}$ – характеристика насоса при сниженных оборотах; $P(Q)_{nom}$ – мощностная характеристика насоса при номинальных оборотах; $P(Q)_{red}$ – мощностная характеристика при сниженных оборотах

Несостоятельность приведенных выше гипотез и прецедентов вызывает сомнения в общей целесообразности применения насосов с преобразователями частоты на канализационных насосных станциях. Для комплексной оценки потенциала экономии электроэнергии, связанного именно с адаптацией работы насоса к реальному притоку сточных вод, обратимся к физическим основам регулирования.

Потенциал экономии электроэнергии

В целях упрощения первичной оценки рассмотрим работу одного насоса в системе с нулевой геометрической высотой подъема жидкости H_r , м. В этом случае изменение основных параметров в системе при снижении числа оборотов от n_1 до n_2 будет описываться общеизвестными формулами, применяемыми для пересчета рабочих характеристик центробежных насосов при изменении числа оборотов рабочего колеса:

– расход Q , м³/ч:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right); \quad (4)$$

– напор H , м:

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2. \quad (5)$$

В графическом представлении изменение рабочей точки системы, соответствующее формулам (4)–(5) приведено на рис. 3.

В соответствии с формулой (4) легко установить, что снижение числа оборотов n ведет к пропорциональному увеличению времени работы τ , ч, что нередко приводится в качестве аргумента против внедрения ПЧ в канализационные насосные станции.

Данное утверждение хотя и является справедливым, не отражает полной картины потребления энергии N , кВт·ч. Действительно, потребляемая насосом мощность P_2 , кВт, может быть рассчитана по формуле [7]

$$P_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_n}, \quad (6)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; η_n – КПД насоса, %.

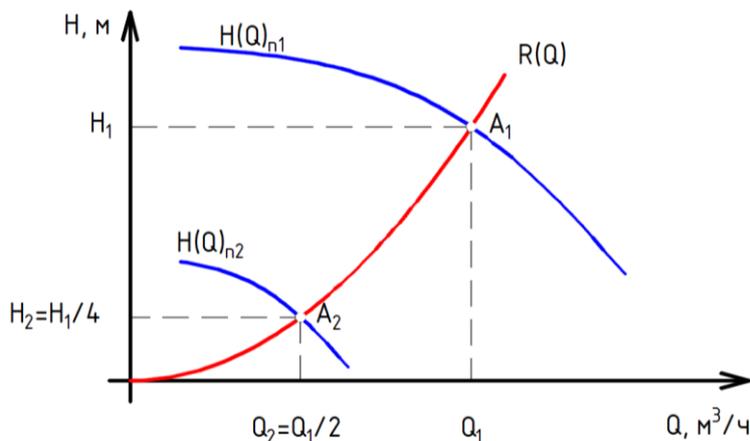


Рис. 3. Регулирование системы изменением числа оборотов насоса:
A₁ – рабочая точка при номинальных оборотах n₁; A₂ – рабочая точка при сниженных в два раза оборотах n₂

Выполняя подстановку уравнений (4)–(5) в уравнение (6), с учетом определения энергии N как произведения времени работы на потребляемую мощность P_2 для систем с отсутствующей геометрической составляющей напора при постоянном КПД и производительности Q получим зависимость затрат электроэнергии N от числа оборотов n :

$$N \sim n^2. \quad (7)$$

В случае перехода с оборотов n_1 до n_2 зависимость (7) примет вид

$$N_2 = N_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2.$$

Приведенное отношение хотя и дает общее представление о возможности экономии электроэнергии путем внедрения ПЧ, требует ряда уточнений, позволяющих перейти от введенной ранее модели к реальным условиям работы канализационных насосов.

В частности, в реальных КНС статическая составляющая (геометрическая высота подъема жидкости H_r) присутствует и может составлять существенную долю потребного напора насоса [16]:

$$H_{\text{потр}} = H_r + s \cdot Q^2, \quad (8)$$

где $H_{\text{потр}}$ – потребный напор в системе, м; s – коэффициент гидродинамического сопротивления сети, м/(м³/ч)².

Очевидно, что снижение расхода при регулировании никак не скажется на статической составляющей напора (геометрической высоте), а значит, общее снижение напора и, соответственно, рассчитываемой по формуле (6) мощности будет тем меньше, чем больше доля статического напора в формуле (8).

Следует также принимать во внимание, что при глубоком регулировании в зависимости от конкретной конструкции рабочего колеса КПД может снижаться на величину до 12–17 % [13].

Более того, в системах со статическим напором необходимо учесть, что при уменьшении числа оборотов n рабочая точка смещается влево относительно исходной кривой максимального значения КПД, что также необходимо учитывать при технико-экономических расчетах. Данное явление подробно описано в работах [10, 13] и наглядно продемонстрировано на рис. 4.

Таким образом, чем больше снижаются обороты насоса, тем значительней снижается КПД в рабочей точке в силу следующих ключевых факторов:

- собственно смещения рабочей точки А влево по характеристике сети $R(Q)$;
- общего ухудшения КПД насоса η , связанного с уменьшением числа оборотов n .

Отметим также, что КПД является уникальной характеристикой для каждого насоса, ввиду чего расчет энергоэффективности от внедрения преобразователей частоты в КНС должен проводиться с использованием реальных графических характеристик применяемых насосов и не может быть описан общей простой математической зависимостью. Существующие попытки математического описания рабочих характеристик насосов [13, 17] в зависимости в том числе от коэффициента быстроходности с расчетом коэффициентов аппроксимации и последующим построением математической модели для анализа возможных режимов работы хотя и представляют научный интерес, едва ли могут быть применены в ежедневной практике работы проектировщиков и инженеров ПТО водоканалов при оценке целесообразности внедрения ПЧ на конкретных КНС.

В контексте инженерных расчетов более целесообразным решением является введение поправочных коэффициентов:

- полезного действия преобразователя частоты $\eta_{\text{пч}}$, %, понижающего общий КПД установки;

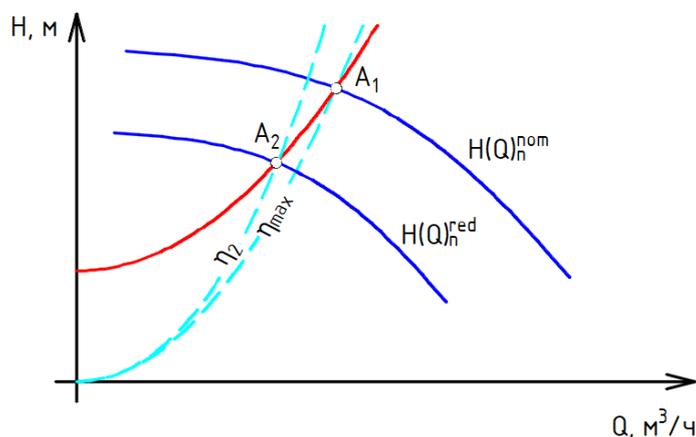


Рис. 4. Изменение КПД насоса при частотном регулировании:
 A_1 – рабочая точка при номинальных оборотах n_1 и максимальном КПД;
 A_2 – рабочая точка при сниженных оборотах n_2

– на снижение КПД электродвигателя при его работе от ПЧ $k_{\eta_{м\text{пч}}}$, равного в среднем 1,03;

– на снижение КПД насоса при уменьшении числа оборотов $k_{\eta_{н\text{пч}}}$, для оценочных расчетов принимаемого равным 1,02.

Последний фактор наиболее сложно поддается оценке, поскольку методики теоретического расчета $k_{\eta_{н\text{пч}}}$ не отработаны, а большинство производителей насосов не приводят подобные сведения в каталогах. При проектировании КНС большой производительности целесообразно запрашивать рабочие характеристики КПД насосов при различных оборотах у их производителей.

Наконец, отметим, что при расчете экономической целесообразности необходимо на всем протяжении регулирования учитывать требования к минимально допустимой скорости движения стоков v_{\min} , м/с, в трубопроводах и для хозяйственно бытовых стоков, равной 1,0 м/с [8]. Данное значение установлено с целью предотвращения выпадения осадка в трубопроводах [18] и связано с расходом Q простой зависимостью:

$$v_{\min} = \frac{Q}{\left(\frac{\pi d_{\text{внут}}^2}{4}\right)}, \quad (9)$$

где $d_{\text{внут}}$ – внутренний диаметр трубопровода, м.

Приведенная зависимость накладывает ограничения на почасовое регулирование, определяя нижний предел производительности насоса в КНС, исходя из диаметров всасывающей и напорной линий. Поскольку в большинстве случаев диаметр всасывающего трубопровода больше, чем напорного, именно он станет определяющим.

Авторы существующих методик расчета [10] также указывают на данное ограничение, но ради декларирования большей экономии от внедрения

ПЧ предлагают занижать указанную скорость и параллельно бороться с возникающими отложениями.

Подобное нарушение СП и надежности работы системы водоотведения представляется нам неоправданным и в рамках разрабатываемой методики будет учтено, что в часы малых притоков обороты будут снижаться не до требуемого уровня, а должны фиксироваться на минимально допустимом значении, обеспечивающем скорость 1 м/с. Эта особенность, безусловно, приведет к дополнительному снижению экономического эффекта от внедрения преобразователей частоты в канализационные насосные станции.

Методика расчета

С учетом вышеизложенных соображений предлагается следующая методика расчета экономической целесообразности внедрения ПЧ в канализационные насосные станции:

1. Строится почасовой график притока сточных вод (рис. 5) [19]. Для действующих КНС целесообразно определение фактических значений притока. При ярко выраженной сезонности строится несколько графиков. Расчет при этом будет производиться для каждого сезона по отдельности.

2. Выполняется подбор насоса методом наложения характеристик (рис. 6). Расход насоса принимается равным максимальному часовому притоку сточных вод $Q_{\max \text{ ч}}$, м³/ч. Напор насоса $H_{\text{потр}}$, м, определяется гидравлическим расчетом для среднего уровня сточных вод. Широкая номенклатура канализационных насосов на современном рынке и возможность заводской подрезки рабочих колес под расчетную рабочую точку позволяют в большинстве случаев выбрать насос без превышения параметров в зоне максимального значения КПД. При построении характеристики сети обязательно учитывается геометрическая составляющая потребного напора H_T (см. рис. 6).

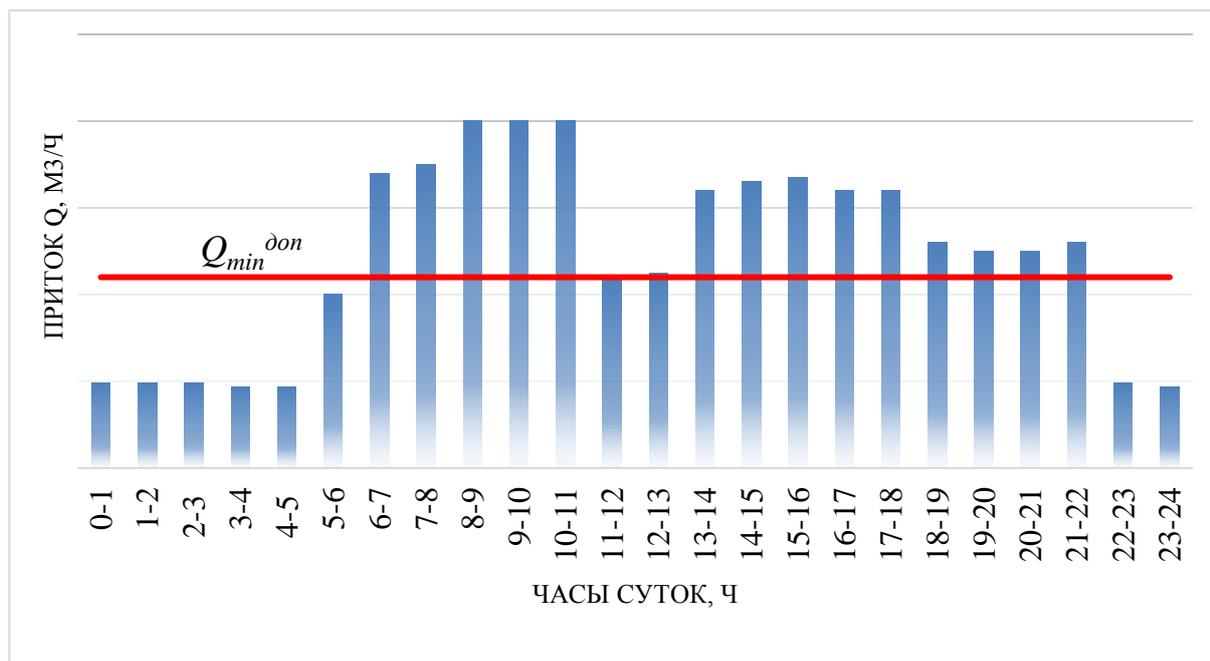


Рис. 5. График притока сточных вод

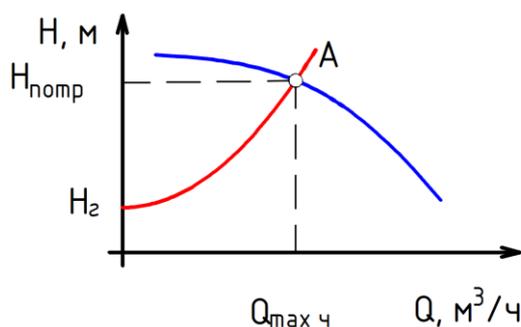


Рис. 6. Подбор насоса методом наложения характеристик

3. Определяется минимальный допустимый расход исходя из диаметра $d_{\text{внут}}$ наибольшего из трубопроводов (в большинстве случаев всасывающего) и минимально допустимой скорости 1 м/с по формуле (9). По результатам расчета на графике притока наносится линия $Q_{\text{min}}^{\text{доп}}$, м³/ч (см. рис. 5).

4. Определяются требуемое число оборотов и соответствующие характеристики насоса для обеспечения расчетного расхода в каждый час суток:

- в часы, когда приток выше минимально допустимого расхода $Q_{\text{min}}^{\text{доп}}$, требуемое число оборотов насоса n_i , об/мин, определяется, исходя из расчетного расхода Q_i . В эти часы насос будет работать без остановки;

- в часы, когда приток ниже минимально допустимого расхода, в расчет принимается $Q_{\text{min}}^{\text{доп}}$ и насос будет работать не полный час:

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{min}}^{\text{доп}}} < 1,$$

что должно быть учтено в дальнейшем при расчете потребленной мощности.

Определение требуемого числа оборотов может быть произведено путем пересчета рабочих характеристик насоса по формулам (4)–(5) с последовательным приближением к расчетному значению расхода. Это весьма трудоемкий процесс, и значительно более удобным является использование общедоступных программ подбора оборудования соответствующих производителей, которые позволяют автоматически перестраивать характеристики насосов на требуемое число оборотов и определять параметры рабочих точек, как это показано на рис. 7.

5. Определяется потребляемая насосом энергия в течение суток в режиме регулирования $N_{\text{сут}}^{\text{рег}}$, кВт·ч, в соответствии с формулой

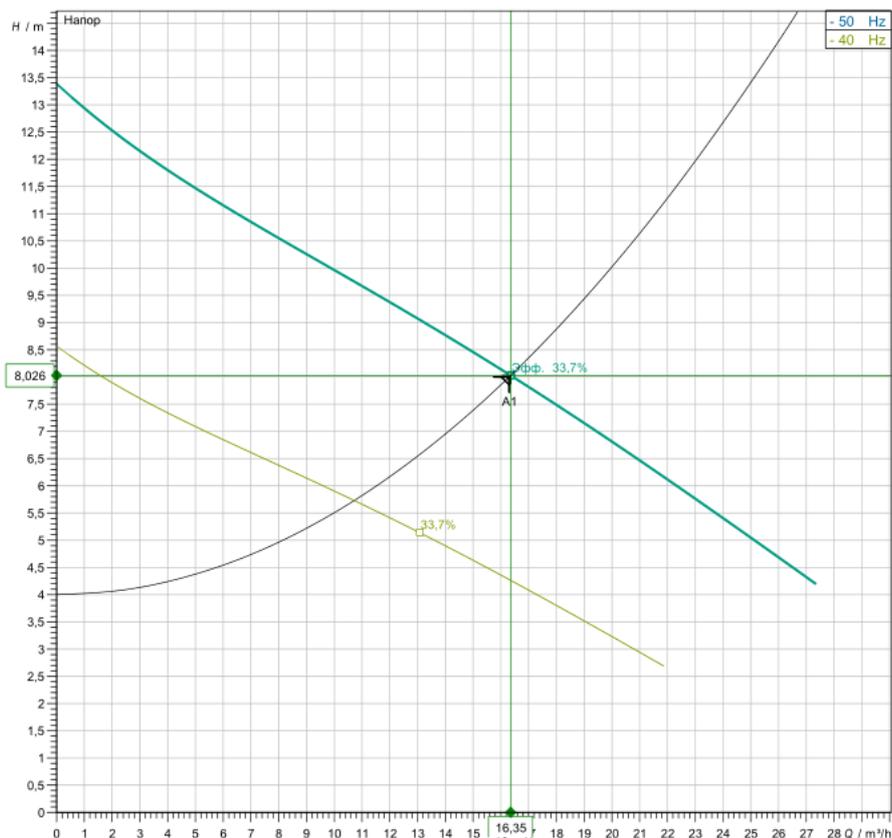


Рис. 7. Автоматическое построение характеристики насоса на сниженных оборотах

$$N_{\text{сут}}^{\text{пер}} = \sum_{i=1}^{24} \frac{N_i^{\text{пер}} \cdot k_{\text{н пч}} \cdot k_{\text{м пч}}}{\eta_{\text{пч}}}, \quad (10)$$

где $N_i^{\text{пер}}$ – потребляемая насосом мощность в i -й час суток, кВт·ч, определяемая по одной из следующих формул:

– в часы, когда приток ниже $Q_{\text{мин}}^{\text{доп}}$, – по формуле

$$N_i^{\text{пер}} = P_{li}^{\text{пер}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{мин}}^{\text{доп}}} - 1, \quad (11)$$

где $P_{li}^{\text{пер}}$ – потребляемая из электросети мощность в расчетный час, кВт, определяемая по рабочим характеристикам насоса, построенным при выполнении предыдущего пункта для соответствующих чисел оборотов; 1 – продолжительность i -го периода, ч;

– в часы, когда приток выше минимального, будем пользоваться формулой

$$N_i^{\text{пер}} = P_{li}^{\text{пер}} \cdot 1. \quad (12)$$

Отметим, что при расчетах необходимо учитывать именно мощность, потребляемую из электросети, в то время как в каталогах в большинстве случаев приводится мощность на валу насоса P_2 , кВт, требующая пересчета с учетом КПД электромотора $\eta_{\text{эм}}$, %. В связи с этим удобнее прибегнуть

к программам подбора, позволяющим автоматически формировать характеристики мощности, потребляемой из электросети P_1 , как это показано на рис. 8.

Результаты расчетов удобно заносить в таблицу, пример которой приведен ниже (табл. 1).

6. Определяется потребляемая насосом мощность в течение суток в стандартном режиме работы без ПЧ.

В классическом режиме работы стандартный канализационный насос включается при максимальном уровне стоков в приемном резервуаре и отключается при минимальном. При этом крутизна характеристики сети остается неизменной, а меняется положение ее вершины. Рабочая точка насоса «плавает» в диапазоне от A_1 до A_2 (рис. 9).

Поскольку приток жидкости в КНС колеблется в течение часа, определить точно, сколько времени в какой рабочей точке будет эксплуатироваться насос, не представляется возможным. Для практических расчетов предлагаем использовать параметры насоса в рабочей точке A_3 , соответствующей среднему значению уровня. Тогда суточное потребление в стандартном режиме $N_{\text{сут}}^{\text{ст}}$, кВт·ч, можно определить по формуле

$$N_{\text{сут}}^{\text{ст}} = P_{\text{лср}} \cdot 1 \cdot \sum_{i=1}^{24} \frac{Q_i}{Q_{\text{мед}}}, \quad (13)$$

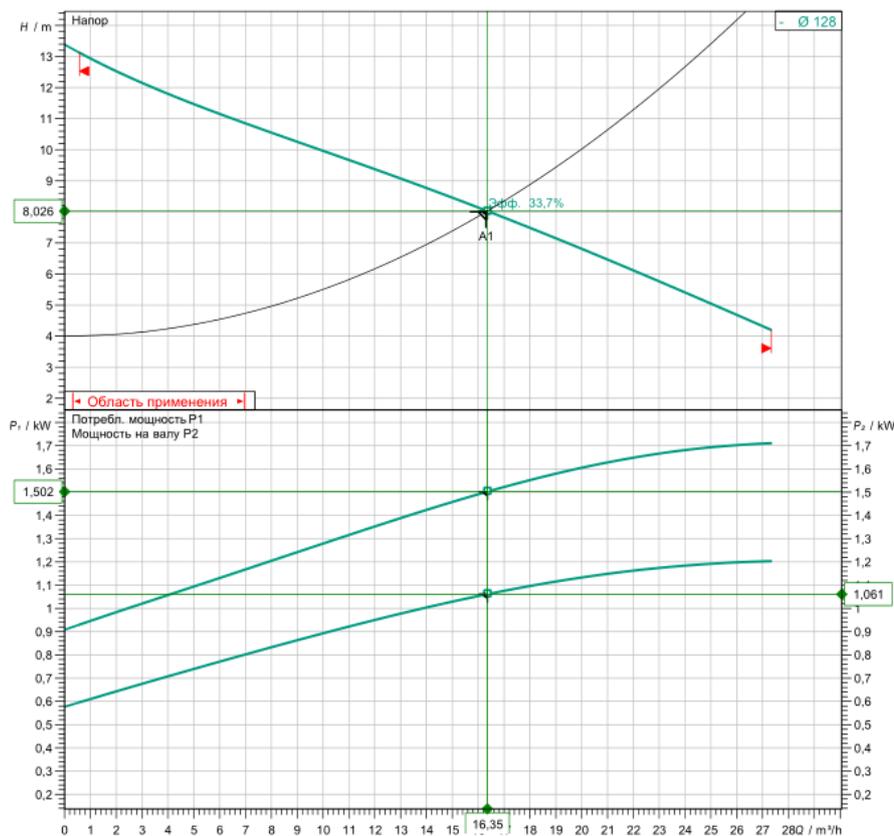


Рис. 8. Сводный график характеристик мощности насоса

Таблица 1

Сводная таблица энергопотребления насоса с ПЧ по часам расчетных суток

Час суток	Q_i , м³/ч	$Q_{\min}^{\text{доп}}$, м³/ч	$\frac{Q_i}{Q_{\min}^{\text{доп}}}$, при $Q_i < Q_{\min}^{\text{доп}}$	$P_{li}^{\text{пер}}$, кВт	$N_i^{\text{пер}}$, кВт·ч
0–1					
<i>i – ii</i>					
23–24					
				Σ	

где $P_{\text{ср}}$ – усредненная потребляемая из электросети мощность, кВт, соответствующая рабочей точке A_3 (см. рис. 9); Q_{med} – средний расход, м³/ч, соответствующий точке A_3 ; 1 – продолжительность i -го периода, ч;

Результаты расчетов рекомендуется заносить в таблицу, пример заполнения которой приведен ниже (табл. 2).

7. Определяется экономия энергии в течение суток за счет применения ПЧ $\Delta N_{\text{сут}}$, кВт·ч, в соответствии с формулой

$$\Delta N_{\text{сут}} = N_{\text{сут}}^{\text{ст}} - N_{\text{сут}}^{\text{пер}} \quad (14)$$

8. Наконец, для принятия решения об экономической целесообразности внедрения ПЧ рассчитывается срок окупаемости CO , лет, дополнитель-

ных капитальных вложений по общепринятой формуле

$$CO = KB / (\Delta N_{\text{сут}} \cdot 365 \cdot CЭ), \quad (15)$$

где KB – размер дополнительных капиталовложений, руб.; $CЭ$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

Отметим, что при расчете дополнительных вложений KB необходимо учитывать не только собственно затраты на приобретение, монтаж и ввод в эксплуатацию соответствующей системы автоматизации с ПЧ, но и возможные дополнительные расходы на приобретение насосных агрегатов с электродвигателями, подготовленными для работы с ПЧ, или замену стандартных электродвигателей на существующих насосах.

Еще один фактор, который может повлиять на итоговое решение, – возможность появления виб-

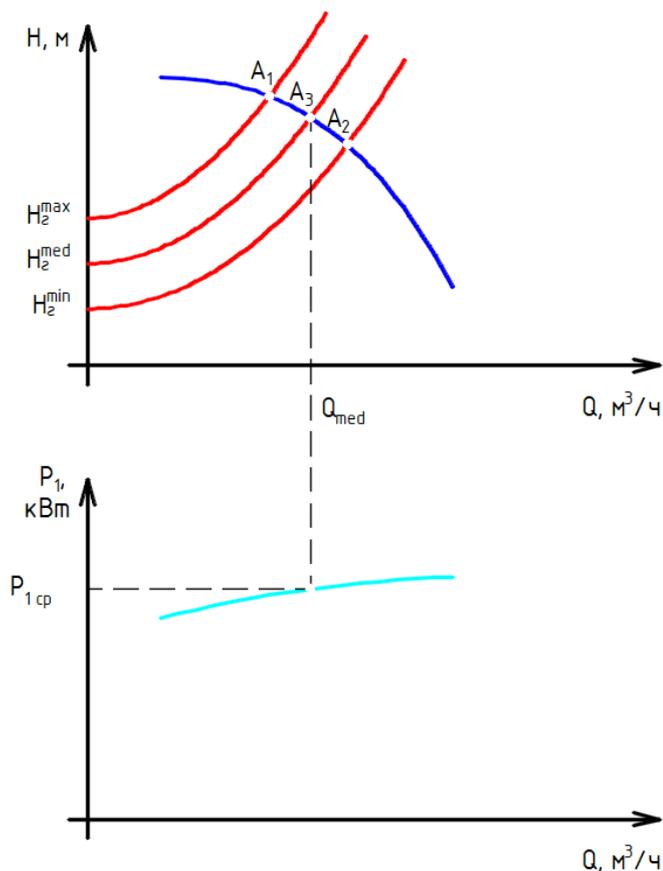


Рис. 9. Рабочие точки насоса в стандартном режиме работы:

- A_1 – рабочая точка стандартного насоса при максимальной высоте подъема H_T^{max} , м;
- A_2 – рабочая точка стандартного насоса при минимальной высоте подъема H_T^{min} , м;
- A_3 – рабочая точка стандартного насоса при усредненной высоте подъема H_T^{med} , м;
- Q_{med} – средний расход, м³/ч, соответствующий точке A_3 ;
- P_{1cp} – потребляемая из сети мощность в точке A_3

Таблица 2

Сводная таблица энергопотребления стандартного насоса по часам расчетных суток

Час суток	Q_i , м³/ч	Q_{med} , м³/ч	Q_i / Q_{med}
0–1			
<i>i – ii</i>			
23–24			
		Σ	
		P_{1cp} , кВт	
		Итого за сутки, $N_{сут}^{ст}$, кВт·ч	

раций (резонансных явлений) насосов на определенных частотах. Вероятность возникновения данной проблемы трудно прогнозируема, однако собственный опыт авторов подтверждает ее существование. При этом единственно возможным решением может оказаться отказ от эксплуатации насосов на таких частотах, что, в свою очередь, может привести к дополнительному сокращению ожидаемой экономии.

Выводы

Таким образом, по результатам рассмотрения физических основ регулирования КНС авторами работы доказано наличие экономической эффективности внедрения ПЧ на канализационных насосных станциях. Размер экономического эффекта в значительной степени определяется долей статической составляющей H_T в общей величине напора насоса. Чем выше эта составляющая в каждом конкретном случае, тем меньшую экономию

электроэнергии может принести внедрение преобразователя частоты.

Предложена методика количественного расчета экономической целесообразности внедрения

ПЧ в КНС с использованием реальных рабочих характеристик насосов $H(Q)$ и фактического графика притока сточных вод, ориентированная на практические инженерно-технические расчеты.

Список литературы

1. Pauly C.P. Five principles for energy efficiency // *World Pumps*. 2011. Vol. 2011, № 10. DOI: 10.1016/S0262-1762(11)70336-4
2. Intelligent pumps for building automation systems // *World Pumps*. 2007. Vol. 2007, № 490. DOI: 10.1016/S0262-1762(07)70252-3
3. Vogelesang H. Delivering optimal energy savings // *World Pumps*. 2009. Vol. 2009, № 513. DOI: 10.1016/S0262-1762(09)70217-2
4. Cieslak M. Life cycle costs of pumping stations // *World Pumps*. 2008. Vol. 2008, № 505. DOI: 10.1016/S0262-1762(08)70344-4
5. Kallesøe C.S., Skødt J., Eriksen M. Optimal control in sewage applications // *World Pumps*. 2011. Vol. 2011, № 4. DOI: 10.1016/S0262-1762(11)70138-9
6. Саргин Ю.Н., Глинкин С.М., Королев В.И. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 2. Водопровод и канализация. М.: Стройиздат, 1990, 247 с.
7. Турк В.И. Насосы и насосные станции. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961, 328 с.
8. СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Стандартинформ, 2019.
9. СП 30.13330.2020 Внутренний водопровод и канализация зданий. М.: Стандартинформ, 2021.
10. Мальцев А.Н., Хватов О.С., Тихомиров В.А. Техническая актуальность автоматизации канализационных станций на базе преобразователя частоты и программируемого логического контроллера // Вестник ВГАВТ. 2015. № 42. С. 268–275.
11. Усачев А.П. Технологические особенности частотного управления насосными агрегатами водопроводных и канализационных насосных станций // Сибирь-Мехатроника. 2007. № 8. С. 1–2.
12. Ченчик В.А. Техничко-экономическое обоснование внедрения систем управления с частотно-регулируемым электроприводом // Химическая техника. 2015. № 3.
13. Николаев В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04. М., 2010. 48 с.
14. Andreas T. Increasing the efficiency of water // *World pumps*. 2013.
15. Альтшуль А.Д. Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. Москва: Стройиздат, 1975, 323 с. – Текст: непосредственный.
16. Berezin S. Submersible pumps for wastewater applications // *World Pumps*. 2006. Vol. 2006, № 480. DOI: 10.1016/S0262-1762(06)71080-X
17. Szychta L. System for optimising pump station control // *World Pumps*. 2004. № 449. DOI: 10.1016/s0262-1762(04)00109-9
18. Thamsen P.U. Cutting clogging in wastewater // *World Pumps*. 2009. Vol. 2009, № 511. DOI: 10.1016/S0262-1762(09)70140-3
19. Канализация / З.Н. Шишкин, Я.А. Карелин, С.К. Колобанов, С.В. Яковлев. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961, 587 с.

References

1. Pauly C.P. Five principles for energy efficiency. *World Pumps*. 2011;2011(10). DOI: 10.1016/S0262-1762(11)70336-4
2. Intelligent pumps for building automation systems. *World Pumps*. 2007;2007(490). DOI: 10.1016/S0262-1762(07)70252-3
3. Vogelesang H. Delivering optimal energy savings. *World Pumps*. 2009;2009(513). DOI: 10.1016/S0262-1762(09)70217-2
4. Cieslak M. Life cycle costs of pumping stations. *World Pumps*. 2008;2008(505). DOI: 10.1016/S0262-1762(08)70344-4
5. Kallesøe C.S., Skødt J., Eriksen M. Optimal control in sewage applications. *World Pumps*. 2011;2011(4). DOI: 10.1016/S0262-1762(11)70138-9
6. Sargin U.N., Glinkin S.M., Korolev V.I. *Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustrojstva. Chast' 2 Vodoprovod i kanalizacija* [Indoor sanitary equipment. Part 2 Water supply and sewerage]. Moscow: Strojizdat Publ; 1990. 247 p. (in Russ.)

7. Turk V.I. *Nasosy i nasosnye stancii* [Pumps and pump plants]. Moscow: Government publishing house for building, architecture and building materials; 1961. 328 p. (in Russ.)
8. SP 32.13330.2018 *Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija* [Set of Rules 32.13330.2018. Sewerage. Pipelines and wastewater treatment plants]. Moscow: Standartinform Publ. 2019. (in Russ.)
9. SP 30.13330.2020 *Vnutrennij vodoprovod i kanalizacija zdaniy* [Set of Rules 30.13330.2020. Internal water supply and sewerage of buildings]. Moscow: Standartinform Publ. 2021. (in Russ.)
10. Maltsev A.N., Hvatov O.S., Tihomirov V.A. Technical relevance of automation sewage pumping stations based on frequency inverter and programmable logic controller. *Bulletin of VSAWT*. 2015;42:268–275. (in Russ.)
11. Usachev A.P. [Technological features of pumps, water treatment and wastewater pump plants control via frequency converters]. *Sibir'-Mehatronika* [Siberian mechatronics]. 2007;8:1–2. (in Russ.)
12. Chenchic V.A. [Technical-economical relevance of automation systems with frequency converters]. *Himicheskaja tehnika* [Chemical engineering]. 2015;3. (in Russ.)
13. Nikolaev V.G. *Energoberegayushchiye metody upravleniya rezhimami raboty nasosnykh ustanovok sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya. Avtoref. dokt. diss.* [Energy efficient methods of water treatment and wastewater plants operation. Abstract of doct. diss.]. Moscow, 2010. 48 p.
14. Andreas T. Increasing the efficiency of water. *World pumps*. 2013.
15. Altshul A.D., Kiselev P.G. *Gidravlika i ajerodinamika* [Hydraulics and aerodynamics]. Moscow: Strojjizdat Publ; 1975. 323 p. (in Russ.)
16. Berezin S. Submersible pumps for wastewater applications. *World Pumps*. 2006;2006(480). DOI: 10.1016/S0262-1762(06)71080-X
17. Szychta L. System for optimising pump station control. *World Pumps*. 2004(449). DOI: 10.1016/s0262-1762(04)00109-9
18. Thamsen P.U. Cutting clogging in wastewater. *World Pumps*. 2009;2009(511). DOI: 10.1016/S0262-1762(09)70140-3
19. Shishkin Z.N., Karelin I.A., Kolobanov S.K., Jakovlev S.V. *Kanalizacija* [Sewerage]. Moscow: Government publishing house for building, architecture and building materials; 1961. 587 p. (in Russ.)

Информация об авторах:

Сперанский Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pavel.speranskiy@mail.ru

Сорокина Наталия Георгиевна, ст. преподаватель кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sorokinang@susu.ru

Сперанский Семен Павлович, студент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sam.speranskiy@mail.ru

About the authors:

Pavel V. Speranskiy, PhD (tech.), Assistant professor at the South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pavel.speranskiy@mail.ru

Nataliya G. Sorokina, senior lecturer at the South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sorokinang@susu.ru

Semyon P. Speranskiy, student at the South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sam.speranskiy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2024, принята к публикации 05.06.2024.

The article was submitted on 31.05.2024; approved after review on 05.06.2024.