

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ПОЛЬДЕРНЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ С СИФОННЫМИ ВОДОСБРОСАМИ

**Э. Н. Шкутов**, кандидат технических наук

**В. П. Иванов**, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации»,  
г. Минск, Беларусь

### Аннотация

Рассмотрена методика оперативной оценки актуальных расходов насосов и к.п.д. электромеханических насосных агрегатов польдерных насосных станций с сифонными водосбросами. Приведен пример ее практического применения на активно работающей насосной станции.

**Ключевые слова:** насосные станции, сифонные водосбросы, измерение расходов откачки.

### Abstract

**E. N. Shkutov, V. P. Ivanov**  
**METHOD FOR ESTIMATING THE  
PERFORMANCE OF PUMP UNITS OF POLDER  
PUMPING STATIONS WITH SIPHON SPILLWAYS**

The technique of operational assessment of relevant expenses of pumps and efficiency of electromechanical pump units of polder pumping stations with siphon spillways is considered. The example of its practical application on actively working pump is given.

**Keywords:** pump stations, siphon spillways, measurement of expenses of pumping.

### Введение

В сельскохозяйственном производстве Беларуси используется более 250 тыс. га. пойменных земель, осушенных польдерными системами. Откачка воды обеспечивается около 500 насосными станциями. Ежегодное потребление электроэнергии польдерными насосными станциями в средние по водности годы составляет 20 млн кВт·ч в год (удельная величина затрат на конкретных объектах сильно зависит от водности года, конструкции системы и состояния оборудования).

Большинство насосных станций эксплуатируется уже порядка 40–45 лет, износ оборудования близок к 100 % от нормативных сроков. Это состояние угрожает не только их выходом из строя в периоды весенне-летних паводков, когда требуется почти круглосуточная их работа, но и перерасходом энергии на обеспечение требуемого водного режима в близкие к среднемуголетним показателям годы из-за работы насосных агрегатов в зоне низких коэффициентов полезного действия (далее – КПД) по причине высокой изношенности.

Для повышения эффективности работы насосных агрегатов польдерных систем важно своевременно их обслуживать и ремонтировать. Результаты обследования насосных станций и системы поддержания их работоспособности [1] позволили сделать вывод, что мелиоративная отрасль при всех сопутствующих недостатках и просчетах все же по мере возможностей работала над повышением эффективности их работы [2].

На практике операторы, длительное время работающие на интенсивно используемых насосных станциях, могут в любой момент представить свою, субъективную, но близкую к фактической сравнительную оценку функционального состояния каждого агрегата своей станции. Однако эта оценка чаще всего не является решающим аргументом для специалистов предприятий мелиоративных систем (ПМС), принимающих решения об остановке и ремонте насосных агрегатов. Чаще всего насосные агрегаты мелиоративных польдерных станций выводятся на ремонт только после

наступления фазы очевидной неработоспособности, которому предшествует длительный период работы насоса с низким КПД. Этот подход приводит к перерасходу электроэнергии и другим затратам на поддержание требуемого водного режима на площадях польдерных систем.

Выбор момента для проведения ремонта, например, по прошествии заданного времени после предыдущего ремонта, также может содержать значительные погрешности в оценке степени износа механических частей насоса. Ускоренный износ может вызываться прокачкой больших объемов воды, содержащих водные растения и ракушки, которые являются эффективными абразивными материалами, вызывающими ускоренный износ крыльчаток и корпусов насосов.

Очевидно, что наиболее обоснованным было бы решение о необходимости проведения ремонта, принятое по данным объективных измерений расходов и определения актуального фактического КПД. Однако задача осложняется многообразием конструкций польдерных насосных станций, обуславливающим необходимость применения существенно различающихся методик и средств измерения.

### **Цель исследований**

Необходимо разработать малозатратную методику оценки расходов и, соответственно, КПД насосных агрегатов с сифонными водосбросами (схема такого варианта конструкции насосной станции представлена на рис. 1), уточнить применяемые в ней константы и обосновать принципиальную допустимость ее применения в производственных условиях.

Методика разработана и использовалась авторами при выполнении НИР для оценки сезонных объемов откачки польдерными насосными станциями в южной и центральной частях РБ.

Следует отметить, что такой вариант водосброса (рис. 1) оказался достаточно эффективным для природных условий Беларуси. Вследствие этого схема широко распространена в проектных решениях, и предлагаемая разработка может быть полезна широкому кругу производственных организаций и научных работников.

Это увеличивает стоимость требуемого набора оборудования для измерения расходов до недоступного для отрасли уровня, несмотря на то, что в настоящее время имеются рыночно доступные технические и методические возможности.

Тем не менее в Республике Беларусь за более чем 40 лет массового использования осушительных польдерных систем так и не была сформирована служба определения расходов воды откачиваемой мелиоративными польдерными насосными станциями, например, по запросам эксплуатирующих предприятий, хотя это решение неоднократно пытались реализовать [2]. Очевидно, высокая стоимость оборудования и самих измерений расходов оказалась при принятии решения более весомым аргументом, чем необходимость объективной оценки объемов откачиваемой воды и КПД насосных агрегатов.

Таким образом, на данный момент актуальной задачей является разработка недорогих, простых в исполнении методик и технологий, которые позволят сотрудникам эксплуатирующих организаций объективно оценивать эффективность работы насосных агрегатов на польдерных системах.

### **Объекты и методы исследований**

Объектами исследования являлись способы формирования меток из воздушных пузырьков и динамика их перемещения в водном потоке ниспадающих ветвей сифонных водосбросов насосных станций.

Основным методом исследования и обоснования возможности применения разработанной методики в практике научных исследований и производственной деятельности являлись физическое моделирование и полевые исследования гидравлических условий ниспадающих ветвей сифонных водосбросов.



Расход насосного агрегата определяется по известной формуле

$$Q_i = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4 \cdot t}, \quad (1)$$

где:  $d$  – внутренний диаметр сбросного трубопровода, м;

$L$  – длина участка трубопровода между контрольными сечениями сбросного трубопровода, м;

$t$  – время прохождения участка центром тяжести метки, с.

В основу разработки методики было положено следующее наблюдение: с помощью клапана срыва вакуума на сифонном водосбросе можно создавать в потоке сбрасываемой воды заметную метку из совокупности воздушных пузырей (рис. 2, а), выход которой из сбросного водовода наблюдается в водоприемнике (рис. 2, б).

Для практического использования методики потребовалось уточнить значения нескольких параметров.

1. Как долго следует держать открытым клапан срыва вакуума? За это время необходимо создать на выходе трубы водосброса заметную группу пузырей – значит, чем дольше, тем лучше. Однако при долгом принудительном его открытии нарушается работа сифона. Опытами на нескольких насосных станциях было установлено приемлемое значение данного параметра – 3–5 с. За это время создается заметный

выброс воздуха, а режим работы сифона не нарушается.

2. На выходе из сбросного трубопровода до появления на поверхности воды пузыри метки преодолевают глубину погружения щелуги водосброса под уровень воды в отводящем канале (не менее 0,3 м, иначе не работает сифон, и не более 2 м – типичное максимальное заглубление сбросного трубопровода насосных станций в поймах рек Республики Беларусь).

Процесс подъема пузырей даже в спокойной стоячей воде представляет собой сложный многофакторный процесс. По опубликованным данным [3], влиянием изменения атмосферного давления и содержанием солей в откачиваемой воде, из-за незначительности вносимых отклонений, можно пренебречь. Скорость в большей мере зависит от температуры (вязкости) воды (если ее не учитывать, погрешность может составить до 50 % от времени подъема пузырей к поверхности).

Скорость подъема пузырей также существенно зависит от их диаметра, причем зависимость имеет сложный неоднозначный характер. На рис. 3 представлен пример вида этой зависимости, полученный экспериментально [3]. В проведенном нами эксперименте на физической модели, имитировавшей подъем пузырей в трубе, получены результаты, совпадающие с данными рис. 3 (скорость всплытия в стоячей воде составила 0,15 м/с).



Рисунок 2 – Формирование метки (воздушных пузырей) с помощью кратковременного открытия клапана срыва вакуума в сифонном водосбросном водоводе насосной станции системы «Гало-Ковалевская»

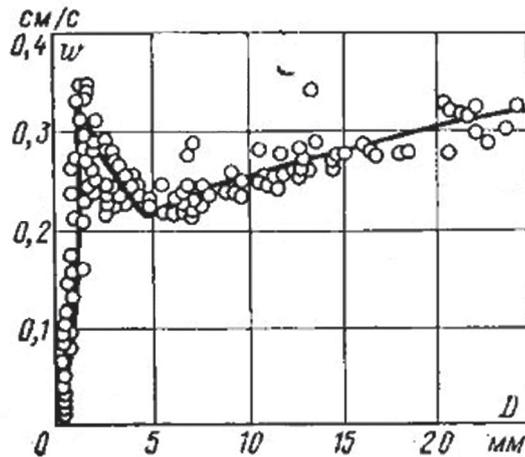


Рисунок 3 – Скорость всплытия воздушных пузырей в воде, в зависимости от их диаметра (0,1 МПа, ≈20 °С)

Однако в рассматриваемой конструкции речь идет о всплытии стохастически формирующегося широкого спектра диаметров пузырей: от миллиметровых до 0,5 м. Кроме того, процесс происходит в очень бурном и резко замедляющимся турбулентном потоке, в практически стоячей воде водоприемника. Скорости перемещения турбулентных вихрей и пузырей в зоне выхода потока из сбросных труб на порядок выше скоростей всплывания, обычно в 7–8 раз. То есть, если не учитывать увеличение времени фиксации на период перемещения пузырей к поверхности, ошибка определения скорости потока может составить 12–14 %.

Экспериментальных данных опытов с такими гидравлическими условиями и геометрическими размерами пузырей, как на выходе сбросных трубопроводов насосных станций в публикациях не выявлено. Точное определение фактических диаметров пузырей в полевых условиях весьма затруднено, поэтому измерение размера всплывающих пузырей в предлагаемой методике не предусмотрено. Для практических целей использовались не результаты теоретических расчетов, а экспериментальные данные наблюдений в производственных условиях.

На насосной станции, где проводились исследования, глубина верха сбросных труб составляла 1,6–2 м (в зависимости от сезона). Время подъема пузырей с такой глубины – 2,5–3 с, средняя скорость их подъема в летних условиях – 0,6 м/с при температуре воды 17 °С.

При отклонениях температуры воды в расчеты рекомендуется вносить поправочный коэффициент

$$V_{\text{под}}(T) = 0,6 \cdot K(T), \quad (2)$$

где:  $V_{\text{под}}(T)$  – скорость подъема в зависимости от температуры воды, м/с;

0,6 – скорость подъема пузырей, определенная экспериментально при температуре воды 17 °С, м/с;

$T$  – температура воды в момент определения производительности насосов, °С;

$K(T) = 0,6309 \cdot \exp(0,0262 \cdot T)$  – поправочный коэффициент к скорости, определенной для температуры воды 17 °С. Он получен по зависимостям динамической вязкости от температуры воды [4].

При изменении температуры воды от 4 до 25 °С скорость подъема пузырей воздуха увеличивается с 0,4 до 0,7 м/с. Время подъема с глубины 2 м по сравнению со средним изменится максимум на 1,7 с.

Таким образом, если не учитывать изменение температуры воды, а использовать среднее значение скорости подъема пузырей метки, максимальная погрешность определения скорости потока в сбросной трубе насоса от неучета изменения температуры воды составит около 8–12 %. Однако, если не измерять температуру и не рассчитывать скорости подъема, а сразу вводить поправку на сезон (весной, осенью – принимать скорость подъема пузырей 0,5, летом – 0,7 м/с), то погрешность снизится до 4–6 %. Такой погрешностью для практических нужд уже можно пренебречь и с целью упрощения процедуры отказаться от измерения температуры воды при определении расходов откачки.

3. В основу рассматриваемой методики было положено допущение, что пузыри метки перемещаются со скоростью потока. Справедливость этого была проверена на физической модели (схема приведена на рис. 4).

Ниспадающая ветвь сбросной трубы сифона насосной станции «Гало-Ковалевская», где проводилась основная часть экспериментальной работы, моделировалась стеклянной трубкой диаметром 20 мм. Геометрически профиль ветви в масштабе 1:1 повторял профиль и длину сбросной трубы насосной станции. Расход подобран таким образом, чтобы скорость потока на модели была идентична скоростям в водосбросной трубе насосной ( $\approx 3$  м/с).

Эксперимент состоял в одновременном введении в поток окрашенной воды и пузырьков воздуха с последующем отслеживании синхронности их перемещения по трубке с помощью видеосъемки (рис. 4).

Многочисленные повторения опыта позволили зафиксировать факт, что пузырьки во всех случаях находились в пределах метки из окрашенного объема воды. Отклонение от центра тяжести метки из окрашенной воды составляло несколько десятых долей секунды. Значительная часть этого отставания, возможно, связана с тем, что обе метки вводились из одного шприца, поэтому воздух поступал в поток в конце процесса ввода метки. Возможная погрешность из-за отставания метки из пузырей в десятки раз меньше возможных ошибок по времени регистрации начала и конца выхода метки на поверхность воды сбросного канала. Поэтому на практике можно использовать метки из пузырей при измерении скорости потока в трубах сифонных водосбросов польдерных насосных станций без введения в расчет корректирующих коэффициентов или зависимостей.

#### Пример определения расхода откачиваемого насосной станцией с сифонным водосбросом

На мелиоративной польдерной системе «Гало-Ковалевская» проводились гидрологические исследования. Для расчета баланса притоков и оттоков воды важной составляющей являлись объемы откачек насосной станцией из открытой сети польдера. Потребовались достоверные данные о расходах откачек. Для их получения и была разработана рассматриваемая методика.

Приток воды к насосной станции наблюдается круглый год. Поэтому она с разной интен-

сивностью, работает круглогодично. На рис. 5 приведена диаграмма суточных откачек за 2016–2018 гг. Насосные агрегаты имели разную степень износа, периодически извлекались с мест установки для ремонтов, после которых изменялись их характеристики, поэтому для получения достоверных данных по объемам откачиваемой воды важно было иметь актуальные на весь период наблюдений расходы откачек каждого агрегата.

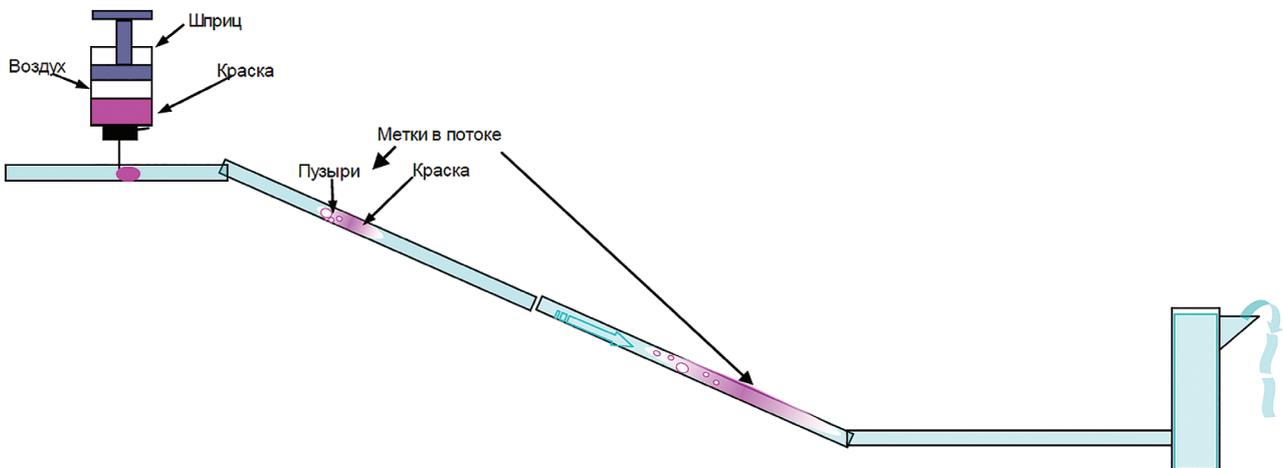


Рисунок 4 – Схема физической модели ниспадающей ветви сифонного водосброса на насосной станции «Гало-Ковалевская»

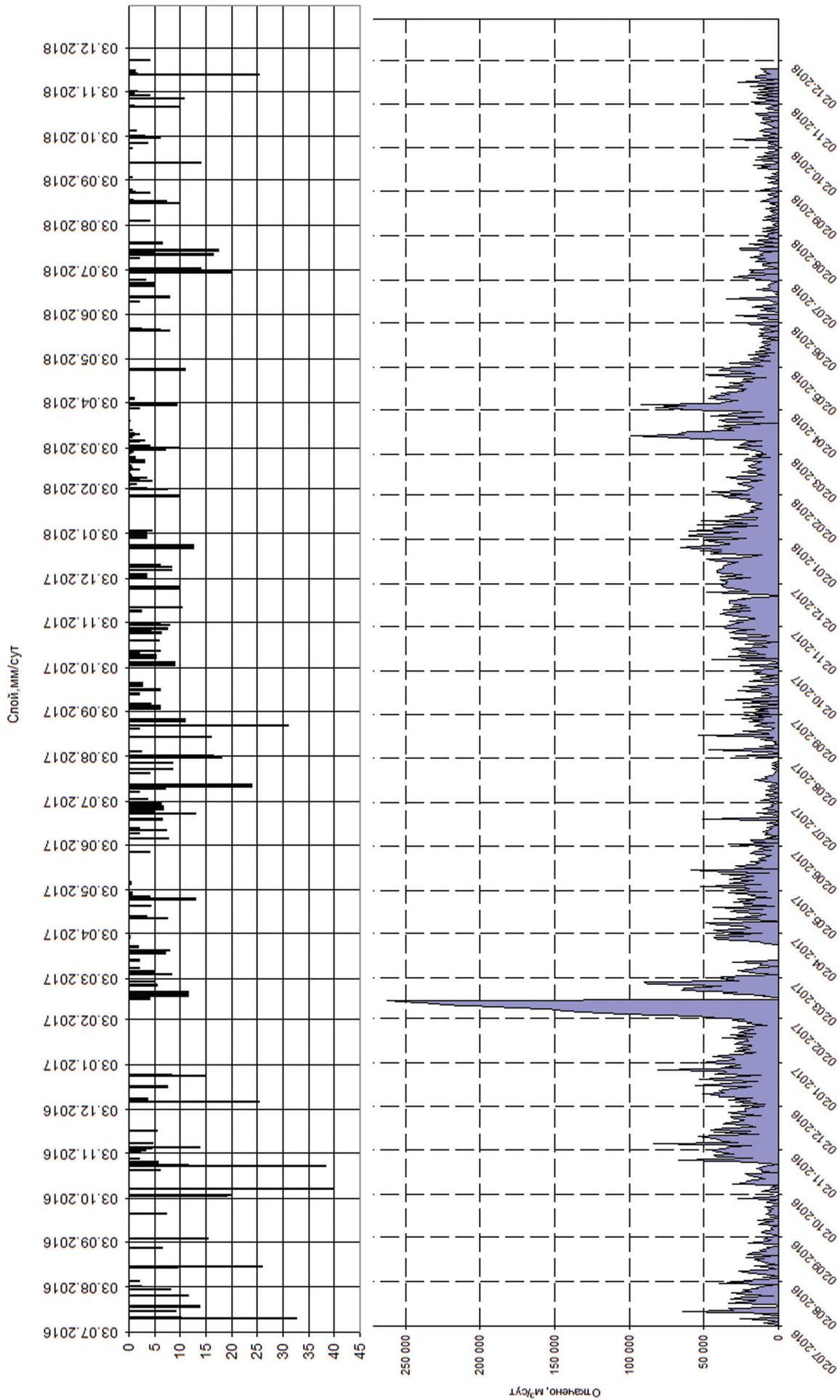


Рисунок 5 — Величина суточных объемов отдачи воды насосной польдерной системы «Гало-Ковалевская» на фоне выпадавших осадков (данные 2016–2018 гг.)

Расходы определялись с частотой раз в 2–3 месяца или после ремонтов. Порядок определения скоростей в сбросных трубах описан выше. Приведем некоторые подробности процесса измерения расходов.

После запуска насосного агрегата, 15–20 мин. работы отводилось для достижения установившегося состояния потока. Затем проводилось 5–6 определений, после каждого определения выдерживалась пауза 5–10 мин. для восстановления установившегося режима откачки. В таблице 1 приведен пример использования первичных экспериментальных данных, полученных исполнителем, и методика расчета расходов. Такие измерения делались по всем работоспособным на момент измерения насосам.

Наиболее точно визуально определяется время начала и конца выхода на поверхность воздушных пузырей. Поэтому оно и фиксируются. При этом время до появления пузырей в отводящем канале включает в себя период от открытия клапана срыва вакуума до всплытия первого пузыря, а время окончания выхода пузырей представляет собой период между закрытием клапана срыва вакуума и окончанием пузырения. Обычно достаточно 5–6 повторов, но если разброс полученных значений велик, то их количество увеличивается до 10. Для определения средних значений в расчет не принимаются самое малое и самое большое значение.

Затем определяется время прохождения центром тяжести метки ниспадающей ветви сифона как среднее между временем начала

и конца выхода пузырей, за минусом времени их подъема от щелюги сбросной трубы до поверхности воды в водоприемнике.

Измеренное расстояние от клапана срыва вакуума до окончания сбросной трубы, деленное на полученное время, дает среднюю скорость потока; умножением на площадь сбросной трубы получаем искомый расход насосного агрегата, актуальный на момент измерения (1).

Далее определяется коэффициент полезного действия (КПД) агрегата в смысле отношения изменения потенциальной энергии откаченной воды к затраченной энергии (по данным об отметках воды в аванкамере и водоприемнике, а также потребляемой насосным агрегатом мощности по показаниям счетчика электроэнергии).

По факту, в приведенном примере значения КПД агрегатов были довольно низкими – очевидно потому, что здесь, помимо износа самих насосов, учтены все виды потерь по насосной и трубопроводам: № 1 – 0,36; №2 – 0,23; № 3 – 0,31.

Вопрос о предельных допустимых к использованию в производстве КПД можно будет решать после накопления статистических данных по фактическим КПД действующих насосных станций. В части же эффективного распределения нагрузки в разрезе насосной станции, можно отметить, что наиболее рациональным является использование по максимуму насосов 1 и 3; насос 2 необходимо готовить к ремонту.

### Заключение

Приведенная методика оперативного определения расходов откачек насосными агрегатами польдерных насосных станций с сифонными водосбросами, реально позволяет вести постоянный надзор за техническим состоянием агрегатов и своевременно принимать обоснованные решения по их ремонту. Хотя точность определения расходов откачки

с помощью предлагаемого способа невелика 15–20 %, все же ее достаточно, чтобы с определенным допуском сравнивать износ агрегатов не только на одной, но и разных насосных станциях, а это позволяет объективно оценивать первоочередность ремонтов уже в разрезе предприятий и объединений.

Таблица 1 – Расчет актуальных расходов насосных агрегатов насосной станции полевой системы «Гало-Ковалевская»

№ насоса	Время открытия клапана (T <sub>0</sub> ), с	Время до начала пузрения (T <sub>1</sub> ), с	Время до окончания пузрения (T <sub>2</sub> ), с	Среднее время до начала пузрения+время открытия клапана $T_{1sr} = T_{0sr} + T_{1sr}$ , с	Среднее время до окончания пузрения T <sub>2sr</sub> , с	Время подъема пузрей до поверхности T <sub>3</sub> , с	Время прохождения метки $T_4 = (T_{1sr} + T_{2sr}) / 2 - T_3$ , с	Скорость, потока, м/с	Расход насосного агрегата, м <sup>3</sup> /с	Длина трубы нисходящей ветви сифонного водосбора L, м	Внутренний диаметр трубы водосбора D, м
1	5	6	20	11	10,5	2	8,75	2,56	0,72	22,4	0,6
1	5	6	10								
1	5	6	10								
1	5	6	12	11	10,5	2	8,75	2,56	0,72	22,4	0,6
1	5	6	10								
1	5	6	15								
2	5	7	20								
2	5	7	18								
2	5	9	22	12,5	19,75	2	14,125	1,585841	0,45	22,4	0,6
2	5	7	15								
2	5	15	20								
2	5	7	19								
3	5	7	25								
3	5	6	13								
3	5	6	13	11	14	2	10,5	2,13	0,60	22,4	0,6
3	5	6	12								
3	5	6	15								
3	5	6	15								

**Библиографический список**

1. Шкутов, Э. Н. Совершенствование режимов работы и конструкций польдерных насосных станций / Э. Н. Шкутов, И. П. Иванов, В. А. Деревянко // Мелиорация. – 2014. – № 2 (72). – С. 30-47.
2. О повышении эффективности функционирования польдерных систем и насосных станций : приказ Белорусского гос. концерна по строительству и эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных систем «Белмелиовохоз» от 20.10.1998 г. № 140. – Минск. – 26 с.
3. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе. – М. : Энергия, 1976. – Изд. 2-е. – 297 с.
4. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972 . – С. 12-13.

Поступила 09.09.2019