

ВОДНОБАЛАНСОВАЯ ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ВОДЫ В СНЕГЕ

О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
omeshyk@gmail.com

Аннотация

В статье анализируются методы расчета снеготаяния, режима снежного покрова в Брестской области. Отмечается большое количество фазовых переходов воды, влияющих на исходное снегонакопление. Оценку запасов воды в снеге и его характеристик предлагается проводить с использованием метода водного баланса. Даются расчетные воднобалансовые схемы.

Ключевые слова: снежный покров, режим, снеготаяние, снегонакопление, сублимация, водный баланс, запас воды в снеге.

WATER BALANCE ESTIMATION OF SNOW WATER EQUIVALENT

A. P. Meshyk, V. A. Marozava, M. V. Barushka

Abstract

This paper gives an analysis of some methods for calculating the amount of melt snow and the regime of snow cover in Brest Region. It is noted that there are many phase transitions of water that influence the initial snow accumulation. Snow water equivalent and its features is proposed to estimate with the use of water balance method. Some design water-balance schemes are provided.

Keywords: snow cover, regime, phase transitions, snow melt, snow accumulation, sublimation, water balance, snow water equivalent.

Введение. Снег представляет собой мощный климатообразующий фактор, а также является важным гидрологическим ресурсом. Он играет значительную роль при взаимодействии климатических, гидрологических и гляциологических процессов. Большое значение снег имеет для земледелия, так как температура почвы, ее влажность, химический состав, структура, насыщенность микроорганизмами в немалой степени зависят от мощности снежного покрова и его свойств. Особенно большую роль снежный покров играет в засушливых областях, где он нередко оказывается основным и единственным источником почвенной влаги. Для территории Беларуси, относящейся к зоне неустойчивого естественного увлажнения, снегонакопление является значимым, так как еще в марте на полях имеет место избыток почвенных влагозапасов, но уже к середине апреля по ряду районов уже требуется дополнительное увлажнение. Для сельского хозяйства снежный покров – это запас воды, необходимой для растений, защита от вымерзания озимых и многолетних культур, корневая система которых является достаточно уязвимой [1].

Однако помимо благоприятных факторов снежный покров может нести и негативные влияния. Так, на территории Республики Беларусь снежный покров является источником питания рек в весенний период, тем самым формируя весеннее половодье, обусловленное таянием снега, накопленного за зиму. Сток весеннего половодья составляет 40–60 % объема годового стока, в период

половодья подвергаются затоплению населенные пункты и сельскохозяйственные земли [2, 3, 4]. Другим неблагоприятным фактором является возможное разрушение конструкций зданий и сооружений в результате сверхнормативных снеговых нагрузок. В первом случае, определяющем величину весеннего половодья и наводнений, является снеготаяние и его интенсивность. Во втором – снегонакопление.

Неустойчивость естественного увлажнения территории Беларуси по годам, ее температурный режим приводят к чередованию циклов снегонакопления и снеготаяния, многочисленным фазовым переходам воды в течение зимнего периода.

Расчеты снегонакопления и снеготаяния лежат в основе практически всех моделей формирования стока весеннего половодья. В настоящее время используются различные модели и методы, включающие разного рода метеорологические характеристики, но одна из важнейших характеристик – это запас воды в снеге [5–9 и др.]. Результаты моделирования во многом определяются выбранным методом расчета снеготаяния и наличием необходимой гидрометеорологической информации. Запас воды в снеге также является определяющим при оценке веса снегового покрова и его воздействии на строительные конструкции.

Материалы и методы. Объектом исследования являются характеристики снежного покрова. В работе использованы официальные данные климатического мониторинга по 9 метеостанциям (Брест, Барановичи, Высокое, Ганцевичи, Дрогичин, Ивацевичи, Пинск, Полесская, Пружаны) Брестской области Республики Беларусь. Данные характеризуют: температуру воздуха (максимальную, минимальную, среднюю), °С; максимальную скорость ветра, м/с; сумму атмосферных осадков, мм; относительную влажность, %; высоту снежного покрова, см; плотность снега, г/см³; запасы воды в снеге, мм [10].

Предметом исследования являются методы оценки процессов снегонакопления и таяния снежного покрова на исследуемой территории.

Основная часть. Сложные процессы снегонакопления и снеготаяния обусловлены рядом факторов, которые достаточно сложно смоделировать, особенно в малоизученных районах. Температура воздуха служит главным фактором образования и разрушения снежного покрова. Образование твердых осадков зависит не только от прямого снижения температуры, но и от продолжительности холодного периода, когда температура приземных слоев воздуха ниже 0 °С. В процессе накопления снежного покрова в результате изменения метеорологических условий его свойства и структура меняются послойно. Рыхлая структура обычно свойственна свежевывавшему снегу. Его уплотнение обычно связано с давлением собственного веса и наличием оттепелей. Частные случаи снегонакопления приведены на рисунке 1 [11].

Еще одним не менее важным фактором являются характеристики почвы: влажность и температура. Если под снегом находится мерзлый грунт с низкими температурами, то при оттаивании часто наблюдается уплотнение и образование притертой ледяной корки в нижнем слое у поверхности (рисунок 1 б). Вид и количество жидких осадков в период установившегося снежного покрова также вносят свой вклад в изменение его структуры. Когда идет небольшой дождь, на

поверхности снежного покрова может образовываться ледяная корка (рисунок 1 г). Более крупные капли проникают в толщу снежного покрова и способствуют его уплотнению за счет промерзания. На образованной ледяной корке также впоследствии может накапливаться снежный покров (рисунок 1 в). Наличие в снегу механических примесей и пыли приводит к значительному ускорению процесса снеготаяния за счет снижения альбедо.

Основными источниками тепла при снеготаянии являются солнечная радиация, теплообмен с воздушными массами, жидкие осадки, поток тепла от почвы и собственная скрытая теплота плавления при конденсации водяного пара из воздуха на поверхность снега. Интенсивность снеготаяния зависит от скорости уменьшения запасов воды в снеге при таянии. Первые запасы воды используются для насыщения снега. Наполняемость снега водой зависит от его структуры. Плотный слежавшийся зернистый снег практически не задерживает талую воду. Когда она достигает поверхности земли, образуются небольшие потоки, которые создают поверхностный сток (рисунок 1 а). В то же время в процессе поступления на поверхность почвы избыточной (не удерживаемой снегом) талой или дождевой воды (процесс водоотдачи) наблюдается уменьшение общего запаса воды в снежном покрове. При этом часть талой воды остается в толще снежного покрова и определяет его влажность (рисунок 1 а).

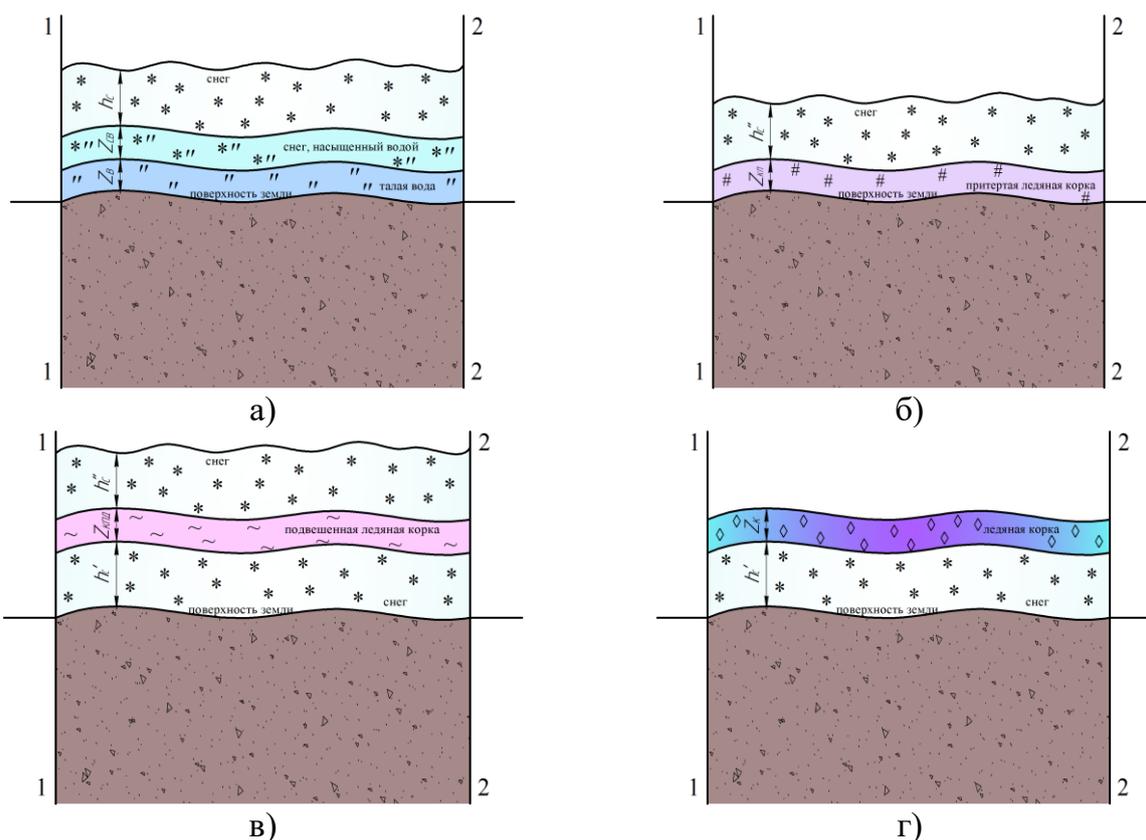


Рисунок 1 – Частные случаи снегонакопления на земной поверхности:
а) свежеснеживший снег–снег насыщенный водой–талая вода; б) снег–притертая ледяная корка; в) снег–подвешенная ледяная корка; г) ледяная корка на поверхности–снег (h_c – средняя высота снежного покрова без ледяной корки; Z_{CB} и Z_B – средние толщины слоя снега, насыщенного водой, и слоя талой воды, по измерениям и в точках определения плотности снежного покрова; h'_c и h''_c – средняя высота снежного покрова под и над ледяной коркой; Z_K , $Z_{КП}$ и $Z_{КПД}$ – средние толщины ледяной корки, подвешенной и притертой ледяной корки)

Характер растительности определяет интенсивность снеготаяния. В лесу процесс таяния снега идет медленнее, чем в поле. Поток талых вод во многом определяется промерзанием грунтов. Если осенью снег выпадает на талую почву и в морозный период скапливается толстым рыхлым слоем, препятствуя промерзанию почвы, то часть весенних талых вод расходуется на фильтрацию и пополнение грунтовых вод.

В итоге можно сказать, что снежный покров на земной поверхности может формировать многослойную и сложную систему (рисунок 1), а основные факторы, влияющие на процесс снеготаяния, – это количество твердых осадков, структура снежного покрова, степень промерзания грунта, изменение температуры воздуха, вид и количество жидких осадков.

К основным методам расчета снеготаяния относятся:

1) метод температурных коэффициентов [12], отражающих физико-географические условия бассейнов рек; основан на предположении о линейной связи между количеством стаявшей воды и приземной температурой воздуха;

2) метод теплового баланса, основанный на расчете суммарного притока тепла к водосбору в период снеготаяния за счет солнечной радиации, теплообмена с атмосферой и землей, процессов испарения и конденсации [13];

3) метод водного баланса, заключается в расчете слоя воды, которая образовалась за период между снегосъемками [14];

4) метод Е.Г. Попова [15], который основан на использовании интегральных показателей интенсивности снеготаяния (температура воздуха и скорость ветра).

Выбор метода для расчета снеготаяния определяется имеющимися исходными данными, изученностью водосбора, плотностью и репрезентативностью сети наблюдений.

Расчет снеготаяния по тепловому балансу обеспечивает в большинстве случаев наиболее высокую точность, поэтому многие авторы в моделях снеготаяния и используют данный метод [12, 16–17 и др.]. Также во многих моделях применяется метод температурных коэффициентов, так как в нем используются материалы сетевых наблюдений [18–21 и др.].

Недостатки метода водного баланса исходят из его трудоемкости и невозможности применения к небольшим промежуткам времени. Метод Е.Г. Попова применяется для характерных весенних условий (температура воздуха выше 0 °С, пасмурная погода, отсутствие прямой солнечной радиации) и не подходит для расчетов на малых водосборах.

Таяние снега можно рассматривать, как энергетический процесс, протекающий в полном соответствии с поступлением и затратой определенного количества тепла и является следствием теплообмена снежного покрова с окружающей средой.

В то же время мы считаем, что воднобалансовая модель способна описать возможные составляющие режима снежного покрова и фактически включает в себя элементы вышеуказанных методов. На рисунке 2 приведена схема расчета запасов воды в снеге с использованием метода водного баланса. На схеме представлены приходные и расходные воднобалансовые составляющие.

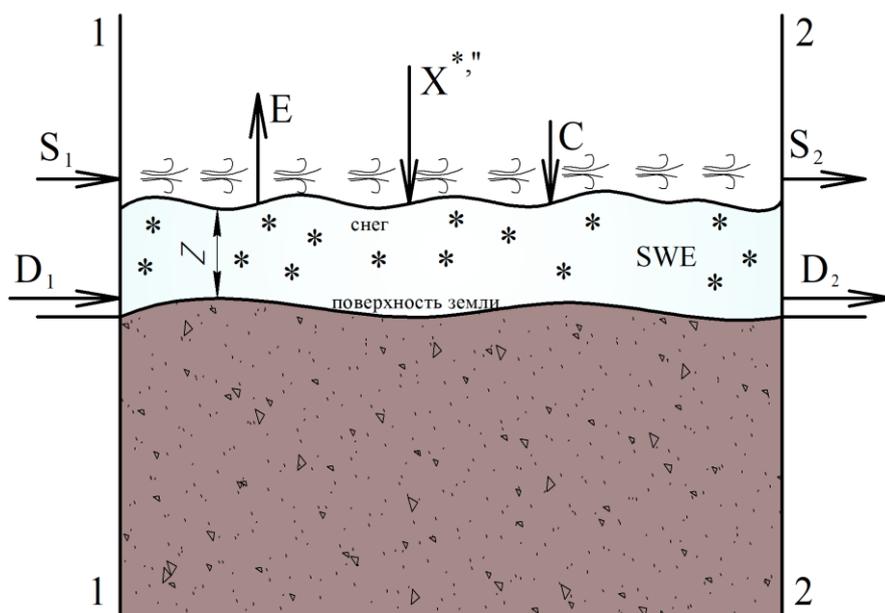


Рисунок 2 – Схема к расчету водного баланса

Уравнение водного баланса за расчетный интервал времени, решаемое относительно запасов воды в снеге, записывается как

$$SWE = X^{*''} + C - E + S_1 - S_2 + D_1 - D_2, \quad (1)$$

где SWE – суммарный запас воды в снеге, мм; $X^{*''}$ – сумма атмосферных осадков (* – твердых, '' – жидких, или смешанных), мм; C – конденсация (сублимация) водяных паров из атмосферного воздуха, мм; E – испарение (сублимация) с поверхности снега, мм; S_1 и S_2 – метелевый снегоперенос, мм; D_1 и D_2 – поверхностный приток и отток растаявшего снега, мм.

В процессе проведения снегосъемок, запасы воды в снеге определяются опытным путем с использованием официальной методики [22] и расчетных схем, представленных на рисунке 1.

Запас воды в слое снега определяется по формуле

$$Q_c = 10 g (h_c - (Z_{cv} + Z_v)), \text{ мм} \quad (2)$$

где g – средняя плотность снега; 10 – коэффициент для перевода высоты слоя воды в миллиметры.

Запас воды в слое снега, насыщенного водой, рассчитывается как

$$Q_{cv} = 10 g_{cv} Z_{cv} = 8 Z_{cv}, \text{ мм} \quad (3)$$

где g_{cv} – плотность снега, насыщенного водой, равная $0,8 \text{ г/см}^3$.

Запас воды в слое талой воды вычисляется по формуле

$$Q_v = 10 g_v Z_v = 10 Z_v, \text{ мм} \quad (4)$$

где g_v – плотность талой воды, равная $1,0 \text{ г/см}^3$.

Запас воды в притертой ледяной корке определяется зависимостью

$$Q_k = g_k Z_k = 0,8 Z_k, \text{ мм} \quad (5)$$

где g_k – плотность ледяной корки, равная $0,8 \text{ г/см}^3$.

Общий запас воды в снежном покрове вычисляется суммированием составляющих

$$SWE = Q_c + Q_{св} + Q_v + Q_k, \text{ мм} \quad (6)$$

Реализация воднобалансового подхода связана с определенными трудностями. Так, в течение зимы могут иметь различные частные случаи снегонакопления и снеготаяния. Атмосферные осадки выпадают как в твердом, так и жидком виде. Наблюдаются частые оттепели, особенно в юго-западной части Беларуси. В качестве примера рассмотрена характеристика режима снежного покрова зимы 2018–2019 гг. по 9 метеостанциям Брестской области. Эта зима характеризовалась достаточно большими снеготаяниями. Появление снежного покрова в этом году было 18.11.2018 на большинстве метеостанций, кроме Пинска – 16.11.2018 и Полесской – 15.11.2018. Последний снег был в диапазоне дат 26.03–16.04.2019. Общее число дней со снежным покровом (дни, когда отмечен снег, независимо от его последующего залегания) распределялось по направлению юго-запад–северо-восток и составило от 50 дней в Бресте до 68 в Барановичах. Устойчивый снежный покров практически на всех метеостанциях образовался 03.01.2019, кроме Бреста – 02.01.2019 и Барановичей – 14.12.2018. Число дней с устойчивым снежным покровом составило от 32 до 53. Устойчивым принято считать снежный покров, который лежит в течение холодного периода года не менее одного месяца с перерывами в общей сложности не более трех дней подряд в месяце. Устойчивый снежный покров образуется через 45–55 дней после первых снегопадов, в течение этого периода наблюдается неустойчивая погода с многократным числом фазовых переходов [23].

Значительные изменения снежного покрова происходят также из-за процессов таяния и испарения, под воздействием жидких осадков и других метеорологических факторов (температура, ветер, влажность и др.).

Проведен анализ метеорологических данных (температура воздуха, скорость ветра, сумма атмосферных осадков и др.) по метеостанциям Брестской области. В качестве примера рассмотрена динамика снежного покрова зимой 2018–2019 гг. в г. Бресте. В эту зиму имело место чередование периодов снегонакопления и снеготаяния вплоть до полного схода снежного покрова с 27.12.2018 по 02.01.2019. Основными факторами снегонакопления являются наличие твердых атмосферных осадков и отрицательная температура воздуха. Сход снега высотой 9 см, фактически произошел за сутки 26.12.2018 при положительной температуре воздуха +3,0 °С и жидких атмосферных осадках. Жидкие атмосферные осадки быстро разрушают снежный покров даже при отрицательных температурах воздуха. Сход снега осуществляется в течение зимы постоянно после образования снежного покрова в результате двух процессов – таяния и испарения (сублимации). Величину стока весеннего половодья определяет преимущественно интенсивность снеготаяния. По нашим оценкам максимальное расчетное снеготаяние может достигать до 26 мм, в среднем 5–6 мм в сутки [2, 5]. Испарение с поверхности снега расчетно

составляет 0,3–0,6 мм в сутки, зависит от температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха.

Заключение. В итоге можно сделать вывод о том, что с использованием гидрометеорологических данных, с определенной точностью, можно оценивать режим снежного покрова, включающий снегонакопление и сход снега. В качестве метода оценки предлагается использовать воднобалансовый, как наиболее полно учитывающий физические процессы, происходящие в снежном покрове. Интенсивность снеготаяния и схода снега зависят от радиационного, ветрового режимов и режима влажности исследуемой территории. Производной составляющей радиационного режима является температура воздуха, которая определяет также частоту фазовых переходов воды как в течение холодного периода, так и в течение суток. Запасы воды в снеге являются определяющими при прогнозировании весеннего половодья и снеговых нагрузок на конструкции зданий и сооружений.

Список цитированных источников

1. Морозова, В. А. Роль снежных мелиораций в сельском хозяйстве / В. А. Морозова // Мелиорация и сельское строительство. Поиск молодежи : сборник научных трудов по материалам II Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и соискателей / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия ; редкол.: Р. А. Другомиллов, Ю. Н. Дуброва. – Горки : РПЦ "Печатник", 2019. – С. 116–118.
2. Мешик, О. П. Роль снежного покрова в формировании весеннего половодья на реках Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Мелиорация. – 2020. – № 4 (94). – С. 35–40.
3. Мешик, О. П. Запасы воды в снеге, формирующие весенние половодья на реках Белорусского Полесья / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель : материалы Международной научно-практической конференции, Горки, 11–12 марта 2021 г. / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Главное управление образования, науки и кадровой политики, Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия ; редкол.: В. В. Великанов (гл. ред.) [и др.]. – Горки : БГСХА, 2022. – С. 149–153.
4. Истомина, М. Н. Наводнения: генезис, социально-экономические и экологические последствия наводнений / М. Н. Истомина, А. Г. Кочарян, И. П. Лебедева // Водные ресурсы. – 2005. – Т. 32. – № 4. – С. 389–398.
5. Meshyk, A., Varushka, M. & Marozava, V. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus. *Environ Sci Pollut Res* 28, 18826–18836 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09638-8>
6. Мешик, О. П. Особенности оценки запасов воды в снеге и их пространственно-временной изменчивости на территории Беларуси / О. П. Мешик, В. А. Морозова // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов : сборник материалов IV

- Международной научно-практической конференции, приуроченной к 1000-летию г. Бреста, 12–14 сентября 2019 г. : в 2 ч. / под ред. А. К. Карабанова [и др.]. – Брест : БрГУ, 2019. – Ч. 2 – С. 34–37.
7. Волчек, А. А. Оценка водного эквивалента снега по данным пассивного микроволнового сканирования земной поверхности с использованием искусственных нейронных сетей для территории Российской Федерации / А. А. Волчек, Д. А. Костюк, Д. О. Петров // Лёд и Снег. – 2016. – № 56(1). – С. 43–51. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-43-51>
 8. Петров, Д. О. Опыт прогнозирования весенних наводнений с использованием спутниковой информации о снеготаянии на речном водосборе / Д. О. Петров, А. А. Волчек, Д. А. Костюк // Водные ресурсы и климат : сборник материалов докладов V Международного Водного Форума / Белорусский государственный технологический университет. – Минск : БГТУ, 2017. – С. 197–201.
 9. Пьянков, С. В. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды / С. В. Пьянков, А. Н. Шихов, П. Г. Михайлюков // Лёд и Снег. – 2019. – № 59(4). – С. 494–508. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>
 10. Климатический кадастр Республики Беларусь. Метеорологический ежемесячник. – Минск : Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 1979–2020 гг.
 11. Мешик, О. П. Методические подходы к оценке режима снежного покрова / О. П. Мешик, В. А. Морозова М. В. Борушко // Вестник БрГТУ. 2022. – № 2(128) : Геоэкология. – С. 139–144. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2022-128-2-139-144>
 12. Комаров, В. Д. Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья равнинных рек / В. Д. Комаров. – Л. : Гидрометеоздат, 1955. – 304 с.
 13. Кузьмин, П. П. Процесс таяния снежного покрова / П. П. Кузьмин. – Л. : Гидрометеоздат, 1961. – 348 с.
 14. Соколовский, Д. Л. Речной сток. / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеоздат, 1968. – 539 с.
 15. Попов, Е. Г. Основы гидрологических прогнозов / Е. Г. Попов. – Л. : Гидрометеоздат, 1968. – 294 с.
 16. Шихов, А. Н. Моделирование процесса снеготаяния на основе метода теплового баланса (на примере водосбора Воткинского водохранилища) / А. Н. Шихов, Р. К. Абдуллин, С. Е. Максимова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.
 17. Турков, Д. В. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области / Д. В. Турков, В. С. Сократов // Лёд и Снег. – 2016. – № 56(3). – С. 369–380. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-369-380>

18. Калинин, В. Г. Моделирование пространственного распределения снежного покрова в период весеннего снеготаяния / В. Г. Калинин, К. И. Суманеева, В. С. Русаков // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 2. – С.74–85.
19. Шайдулина, А. А. Пространственно-временные закономерности снеготаяния на речных водосборах верхней Камы / А. А. Шайдулина, В. Г. Калинин, М. А. Фасахов // Географический вестник = Geographical bulletin. – 2022. – № 1(60). – С. 100–112. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-1-100-112>
20. Гельфан, А. Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России / А. Н. Гельфан, В. М. Морейдо // Лёд и Снег. –2014. – № 54(2). – С. 44–52. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-44-52>
21. Georgievsky M., Ishidaira H., Takeuchi K. Development of a distributed snow model coupled with a new method of degree-day factors estimation // Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 2006. P. 49-54. <https://doi.org/10.2208/prohe.50.49>.
22. ТКП 17.10-42-2009 (02120) Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила проведения приземных метеорологических наблюдений и работ на станциях. – Минск : Минприроды, 2009.
23. Мешик, О. П. Особенности залегания снежного покрова на территории Республики Беларусь / О. П. Мешик, В. А. Морозова, М. В. Борушко // Вестник БрГТУ. – 2021. – № 2(125) : Геоэкология. – С. 93–99. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-125-2-93-99>

УДК 697.1, 697.9, 699.86

БАЛАНСИРОВКА СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ НАСОСОВ

В. Г. Новосельцев, Д. В. Новосельцева

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,
vgnovoseltsev@yandex.ru

Аннотация

Балансировка системы водяного отопления позволяет экономить 20-40% тепла, обеспечить хороший контроль температурного режима зданий, долговечную работу оборудования.

В настоящем исследовании рассматривался вариант наладки двухтрубной тупиковой системы отопления с термостатическими и балансировочными клапанами: увеличение напора насоса для достижения необходимого расхода в элементах системы с недостаточным расходом без балансировки; балансировка с увеличением напора насоса.

Исследования показали недостатки замены существующего насоса на насос с бóльшим напором для достижения необходимого расхода в элементах системы с недостаточным расходом без балансировки: перегрев других частей си-