

DOI 10.15593/2409-5125/2018.01.05

УДК 692.4, 69.002.5, 536.68

Л.В. Задорина, В.А. Муратова, В.А. Голубев, О.М. Зверев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ СНЕГА СО СКАТНЫХ КРЫШ

Рассмотрены различные способы и устройства для уборки и удаления снега со скатных крыш. Метод удаления снега может быть пассивным – сделать крышу такой, чтобы падающий снег сам скатывался вниз, а может быть активным – сгребать, сдувать, плавить. Обсуждается возможность использования большого спектра способов и устройств для уборки снега. Их можно разделить на тепловые и механические. Проведенный теоретический анализ позволил рассчитать минимальную стоимость уборки квадратного метра крыши горячей водой, за счет тепловых сетей, электронагревом, паром и вручную. Экспериментальный анализ был проведен в лаборатории и на моделях крыш. Он позволил определить возможность использования, энергозатратность и скорость удаления снега множеством способов и устройств. Полив кровли горячей водой малоэффективен, так как не гарантирует смыва всего снега и требует последующего водосбора. Наименьший КПД (0,1) при нагреве кровли электрическим кабелем. При плавлении снега теплым воздухом от вентканалов КПД процесса равен 0,2. При использовании пара не более трети энергии пошедшей на получение пара используется в процессе плавления, и процесс слишком медленный. Сдувание снега струей сжатого воздуха происходит на порядок быстрее, но все равно медленнее традиционной уборки лопатой.

Ключевые слова: удаление снега, уборка снега, скатная крыша, нагревательный кабель, парогенератор, компрессор.

Введение. Чистить кровлю от снега необходимо по многим причинам: большие скопления снега повышают нагрузку на строительную конструкцию крыши и инженерные конструкции, установленные на крыше, в том числе водосточную систему. Это может привести к повреждениям, трещинам и деформациям материала кровли и, как следствие, протечкам, сырости в помещениях и промерзанию.

Весной и осенью многократное подтаивание и замерзание воды в налестах, в микроскопических трещинах и других повреждениях кровельного материала приводит к их увеличению и износу кровли.

Задорина Л.В., Муратова В.А., Голубев В.А., Зверев О.М. Теоретический и экспериментальный анализ способов и устройств для удаления снега со скатных крыш // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 1. – С. 70–85. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.05

Zadorina L., Muratova V., Golubev V., Zverev O. Theoretical and experimental analysis of methods and devices for snow removal from pitched roofs. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 1. Pp. 70-85. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.05

Из-за тепла, идущего от внутренних помещений и при оттепелях, снег уплотняется, на кровельном материале образуется наледь и появляются сосульки. Поэтому главная причина необходимости уборки снега с крыши – неконтролируемое падение сосулек или сход всего снега. В лучшем случае это приведет к повреждению ограждений, водостоков, образованию завалов, а в худшем – могут пострадать люди.

В данной статье мы рассматриваем и анализируем теоретически и экспериментально существующие способы и устройства для уборки снега с крыши.

Обзор. Методы удаления снега со скатных крыш условно можно разделить на два: пассивный – сделать крышу такой, чтобы снежные осадки не задерживались на ней, активный – сгребать, сдувать, плавить и даже смывать снежный покров с кровли.

В *пассивном* методе можно выделить два решения. Решение первое – конструкционное. Зимой все обращали внимание на то, что на верхних пологих скатах ломаных крыш мансардного типа (типа «колокол») снег лежит, а на нижних более крутых его нет. Правда возникает вопрос, насколько крутыми должны быть скаты? Пока мы можем только утверждать, что на скатах моделей крыш (рис. 1), установленных в феврале 2017 г. с уклоном 55° , снег задержался на всех 7 кровельных материалах (железо ржавое, 8-волновой шифер, профлисты оцинкованный и крашенный, ондулин, оцинковка плоская, поликарбонат).

Ендовы многощипцовых крыш – накопители снега (рис. 2), из них снег не выдувается, а наоборот, надувается. Это связано в том числе и с тем, что если два смежных ската имеют угол, например 45° , то угол с горизонтом линии ендовы будет $35,3^\circ$. Значит, для реализации первого решения крыша должна быть двускатной, вальмовой или шатровой с большим углом. Но при большом угле потребуется больше строительного материала, сэкономить за счет уменьшения снеговой нагрузки на 1 м^2 кровли вряд ли получится, так как растет ветровая нагрузка (СП 20.13330.2016).

Решение второе – снег не должен прилипать к крыше, т.е. не таять при контакте с кровельным материалом. В этом решении предлагают два подхода: первый – максимально утеплить крышу, второй – максимально утеплить чердачное перекрытие, а температуру на чердаке поддерживать ниже 0° [1]. Увы, не поможет. Снег прилипает, образуя наледь, даже если кровельный материал обдувается со всех сторон (см. рис. 1), а при оттепели бесконтрольно сходит (рис. 3). Поэтому пассивный метод используется крайне редко, и большинство домовладельцев стремится задержать снег от бесконтрольного схода, устанавливая на крышах снегозадержание.



Рис. 1. Модели крыш



Рис. 2. Ендовы –
накопители снега



Рис. 3. Сход снега

Способы и устройства, используемые в *активных* методах удаления снега с крыш по типу воздействия, можно разделить на тепловые и механические.

Все *тепловые* способы и устройства предполагают плавление снега и льда, т.е. превращение его в воду, которая куда-нибудь утечет. Их можно разделить по источникам тепла. В полезной модели [2] и заявке на изобретение [3] предлагают в качестве источника тепла использовать горячую воду, которая будет выливаться из «гибкого шланга или трубы с отверстиями» и растопит снег, наледь и сосульки. Установка для таяния снега [4] утилизирует тепло имеющихся тепловых сетей, что предлагалось еще в 1933 г. [5]. Проще всего использовать для таяния снега и льда электронагрев, поэтому больше всего таких патентов на изобретение [6–8] и др. Авторы [9] предлагают осуществлять процесс плавления с помощью струи пара.

Теоретический анализ. Оценим стоимость плавления при использовании различных источников тепла. Расчеты удобнее вести для 1 т снега (1 м³ воды). Удельная теплота плавления снега $\lambda = 3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг [10], т.е. для плавления 1 т необходимо 335 МДж тепловой энергии.

Согласно п. 2.4 общих положений СанПиН 2.1.4.2496–09, «температура горячей воды в местах водоразбора ... должна быть не ниже 60 °С и не выше 75 °С». Удельная теплоемкость воды 4186 Дж/кг·К [10], значит, 1 м³, охладившись на 60 °С отдаст $Q = cm\Delta T = 4,186 \cdot 1000 \cdot 60 \approx 251$ МДж.

Для плавления 1 т снега необходимо $\frac{335}{251} = 1,33$ м³ горячей воды, средняя

стоимость которой в г. Перми в 2017 г. равна 150 руб. за 1 м³, т.е. $1,33 \cdot 150 \approx 200$ руб./т снега. Но каток перед домом никому не нужен, поэтому воду нужно отправить в канализацию. Средняя стоимость водоотведения в г. Перми в 2017 г. – 18,5 руб. за 1 м³, причем расчет ведется по

количеству потребленной воды, платить за талую воду не придется. Плюсуюем $1,33 \cdot 18,5 = 25$ руб. и в итоге при 100%-м КПД имеем затраты 225 руб. на 1 т снега.

ООО «Пермская сетевая компания» в 2017 г. поставляла тепло в среднем по 1800 руб./Гкал, или 0,43 руб./МДж. На плавление 1 т снега (КПД = 100 %) будет затрачено $335 \cdot 0,43 = 144$ руб., и за водоотведение не платим.

Средняя стоимость электроэнергии в 2017 г. 3,7 руб./кВт·ч, или примерно 1 руб./МДж, значит, плавление 1 т снега обойдется в 335 руб.

Самый сложный расчет для уборки снега и льда у способа с помощью струи пара. «Для удаления снега и льда с крыши данным способом необходимо иметь ... передвижную паровую установку (ППУ) марки ППУ А-600–А-1200 с расходом дизельного топлива 45 литров в час» [9]. Если КПД паровой установки можно предположить около 80 %, то предположение, что вся теплота, выделившаяся при конденсации пара и последующего охлаждения воды получившейся из пара, пойдет на плавление снега очень сомнительно. Но представим, что мы сжигаем дизельное топливо и вся теплота сгорания идет на плавление снега. Удельная теплота сгорания дизельного топлива 43 МДж/кг, значит, на 1 т снега потребуется $335/43 = 7,8$ кг, или 9,2 л (при средней плотности 850 кг/м³) [10]. Умножим 9,2 л на 38,5 руб. и получим 354 руб. как минимум.

Из вышеприведенных расчетов видно, что наиболее выгодно плавить снег, используя тепловые сети. Но прежде чем начать рассуждения о сложности реализации этого способа, есть смысл сравнить все три способа с традиционной уборкой лопатой. Интернет полон предложениями убрать снег с крыши и стоимость от 10 до 50 руб. за 1 м² в зависимости от сложности. На корпусе СФ ПНИПУ крыша простая, ее уклон 19–22°, он добавляет 6–8 % к площади ската в отличие от горизонтальной поверхности. Уборку проводят максимум два раза за зиму, в малоснежные (зима 2015–2016 гг.) вообще не проводят, поэтому 20 руб. за 1 м² – это максимальная средняя стоимость.

Согласно п. 10.2 СП 20.13330.2016 давление снегового покрова на горизонтальную поверхность для V снегового района (г. Пермь) – 2,5 кПа, т.е. 250 кг/м², 1 т будет распределена на 4 м². Стоимость удаления снега с крыши (при 100%-м КПД процесса) различными способами: полив горячей водой – 56 руб./м²; за счет тепловых сетей – 36 руб./м²; за счет электронагрева – 84 руб./м²; удаление паром – 89 руб./м²; ручная уборка – 20 руб./м². Видно, что ручная уборка самая дешевая. Поэтому напрашивается вывод о том, что не надо мудрить, брать лопату и лезть на крышу. Но

после каждой зимы на крыше корпуса СФ ПНИПУ появляется два-три отверстия, одно из которых показано на рис. 4, горячей водой или паром так кровлю не повредишь.



Рис. 4. Пробоина в кровле

Кроме того, существует много патентов, предлагающих для плавления снега и льда использовать бесплатное тепло от вентиляционных каналов [11–13] или дымовых труб [14]. Посчитаем, сколько выделится теплоты, если воздух, выходящий из вентиляционного канала площадью $S = 0,27 \times 0,14 = 0,0378 \text{ м}^2$ («в кирпич») в течение четырех месяцев зимы ($t = 4 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600 = 10,4 \cdot 10^6 \text{ с}$), охладится на $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость воздуха примем $v = 1 \text{ м/с}$. Удельная теплоемкость воздуха $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ при температуре

от 0 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$, его плотность при нормальном давлении при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ [10].

$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot v \cdot t \cdot \Delta T$, где V – объем воздуха, $V = S \cdot v \cdot t$.

$$Q = 1005 \cdot 1,205 \cdot 0,0378 \cdot 1 \cdot 10,4 \cdot 10^6 \cdot 20 = 9522 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 9522 \text{ МДж.}$$

Для плавления 1 т снега необходимо 335 МДж, значит, расплавим $9522/335 = 28,4 \text{ т}$ или будем поддерживать чистыми от снега 114 м^2 кровли. Измеренная нами горизонтальная проекция кровли СФ ПНИПУ составляет 1150 м^2 . Значит, десяти вентканалов должно хватить. Но в наших расчетах есть одна очень сомнительная цифра – $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Например, устройство [11] содержит «тепловые трубы 1, зоны испарения 2 которых расположены в вентиляционном канале (воздуховоде) 3 вытяжного воздуха, а зоны конденсации 4 тепловых труб 1 закрепляются под водостоками 5 и желобами 6 крыши 7» (рис. 5). Охладят ли эти трубы воздух на $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и сколько тепла передадут снегу? Сколько тепла воздух из «нагревательного элемента», выходящий «через вытяжные отверстия» [12], отдаст снегу, а сколько – улице, без реального эксперимента установить трудно. Кроме того, теплый воздух содержит больше влаги, чем холодный и при охлаждении в морозную погоду над вентиляционными каналами всегда наблюдаются клубы пара, а сами оголовки вентканалов обрастают сосульками. Не сработает ли устройство наоборот, не спровоцирует ли образование сосулек?

Самый бережный способ *механического* воздействия предлагает сдувать снег с помощью струи сжатого воздуха, которую будет направлять

оператор с гибким шлангом [15]. Для осуществления этого способа на крыше здания необходимо закрепить трубу с отводящими патрубками с вентилями, к которым и будет подсоединяться гибкий шланг, а страховочное приспособление для оператора – к самой трубе. Компрессор предлагается разместить на чердаке. Способ хорош, вот только наледь воздухом не сдуешь, поэтому автор предлагает осуществлять уборку, пока снег не успел слежаться, т.е. после каждого снегопада.

Автор [16] предлагает сгребать снег шнековыми лопастями 1, 2, закрепленными на карданных валах 3, 4 вращающихся от приводных блоков 5, 6. Все это установлено на тележке 7, перемещающейся по коньку крыши (рис. 6). Можно сгребать «плужковым сбрасывателем» 1, 2, который приводится в движение двумя канатами 3, 4, огибающими шкивы на тележке 5 и барабан лебедки 6 [17] (рис. 7) или плоской пластиной из прочного материала, которую направляющие тросики двигают вдоль козырька [18]. Но достаточно посмотреть на реальные скатные крыши зданий, чтобы понять невозможность использования этих устройств. На всех крышах есть вентиляционные трубы, антенны, слуховые окна (как минимум одно для обслуживания кровли), ендовы – накопители снега – для таких устройств тоже недоступны.

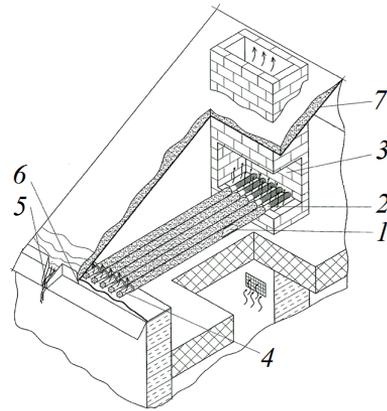


Рис. 5. Устройство для предотвращения образования сосулек [11]

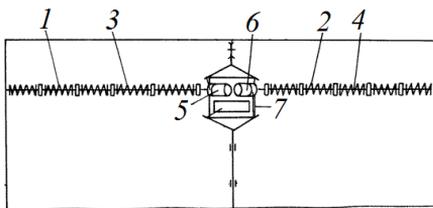


Рис. 6. Устройство для уборки снега с крыши здания при помощи тележки [16]

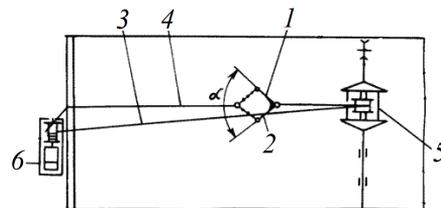


Рис. 7. Устройство для уборки снега с крыши здания плужковым сбрасывателем [17]

Много предложений стряхивать снег, например, с помощью «блоков снегосброса» [19] (рис. 8), представляющих собой подвижные карнизы 1 с закрепленными на них токопроводящими пластинами 2, под которыми

установлены электромагнитные индукторы 3 «вихревых потоков». Генератор вырабатывает импульс разрядного тока, который подается на индукторы 3, вызывая появление переменного магнитного поля, силовые линии которого проходят через токопроводящие пластины 2. В них возникают вихревые токи, магнитное поле которых взаимодействует с магнитным полем индукторов 3. В результате взаимодействия магнитных полей должен произойти «высокоскоростной (молниеносный) выброс подвижного карниза 1 вверх вместе со снегом», система крепежа 4 вернет карниз на место. По правилу Ленца так и должно быть [20]. Но предположение автора, что вышерасположенные над карнизом пласты снега будут спускаться на карниз и также сбрасываться, очень сомнительно: а раньше что мешало спуститься с кровли и упасть на землю?

В работе [21] предлагается агрегат, включающий механизм 1, генерирующий механические колебания, через тросы 2 передающиеся покровным элементам 3 в виде, например, полос из сетчатого материала, соединенные с упругими пластинами 4 (рис. 9). Вибрация, которую испытывают полосы 3 и пластины 4, должна приводить к сбросу с них снега и разрушению сосулек на упругих пластинах. Очень сложно. Авторы [22] предлагают поступить проще: под кровлей 1 параллельно ее поверхности расположить электропривод, трансмиссию в виде вращающегося вала 2 с «рабочими органами» – совокупность маховиков 3 (рычажного типа) с шарнирами 4 (рис. 10).

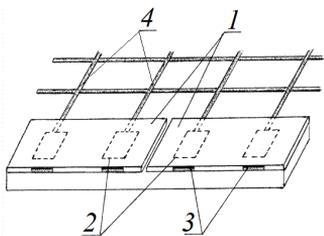


Рис. 8. Устройство для удаления снега [19]

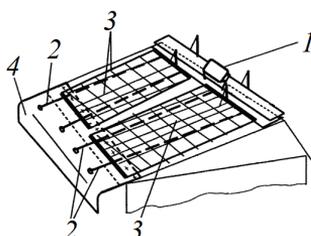


Рис. 9. Агрегат для уборки наледи и снега [21]

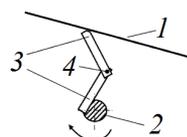


Рис. 10. Устройство для удаления снега и наледи [22]

Предполагается, что при вращении вала 2 с частотой от 100 до 300 об/мин маховики 3, «соприкасаясь с кровлей 1» (на самом деле стуча по кровле), сначала взломают наледь на кровле, а потом заставят осколки сползти по кровле вниз. Невозможно взломать наледь на кровле ударами снизу, не деформируя материала кровли. Если кровля шиферная – шифер ломает, если металлическая – будут вмятины или, как минимум, маховики сотрут защитное покрытие и это вызовет последующую коррозию. В ондулине или

сотовом поликарбонате маховики протрут отверстия. Можно вал с маховиками установить так, чтобы удары маховиков приходились на доску обрешетки или стропило, но не будет ли ударное воздействие гасится? Без реального эксперимента трудно сказать.

Экспериментальный анализ. Цель наших экспериментов – проверить возможность использования того или иного способа для уборки снега и по возможности оценить КПД как физического процесса, используемого в способе, так и КПД устройства для его осуществления. Большую часть экспериментов мы провели 13.12.2017 г. при температуре от -5 до -3 °С на моделях крыш размером $1 \times 1,5$ м (см. рис. 1), установленных с уклоном 1:2,5 (22°). Снег на крыши падал в течение недели и при отрицательных температурах (наледи не было). Предварительно на каждой крыше мы измерили высоту снежного покрова (в 9–10 местах), она оказалась от 40 до 75 мм.

Легче всего было проверить полезную модель [2], для этого мы нагрели в металлической лейке 7 л воды до температуры 60 – 62 °С и стали лить на верхнюю часть листа шифера (рис. 11). Мы специально выбрали для этого эксперимента волнистый материал, чтобы проверить, можно ли, расположив трубу подачи горячей воды вдоль конька крыши, расплавить и смыть снег на всем скате. Однозначный ответ – нельзя. Через 30 с после начала эксперимента в лотки начала капать первая вода, а через 45 с потекла ручейками. При этом рыхлый снежный покров толщиной всего 5 см (над гребнями) полностью не растаял и не обвалился. Вывод – удалять снег со скатной крыши горячей водой можно, только расположив систему орошения по всему скату или бегая по крыше с лейкой или шлангом.

Самым длительным был эксперимент с электронагревом кровли (рис. 12). Для него мы использовали одножильный нагревательный кабель КГС1-320-16, применяемый для устройства теплого пола (длина 16 м, мощность по паспорту 320 Вт, рассчитан на обогрев площади $1,2$ – $2,8$ м²). На всякий случай мы измерили сопротивление провода вольтметром РВ7-22А, получилось $R = 170$ Ом, т.е. реальная мощность кабеля

$$P_k = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{170} = 285 \text{ Вт.}$$

Сопротивление перепроверили еще 5 приборами – результат тот же. Мощность 1 м – $17,8$ Вт/м.

Мы уложили часть кабеля длиной 10,1 м на оцинкованном железе со средней толщиной снежного покрова 5 см. Мощность на листе $P_{л} = 17,8 \cdot 10,1 = 180$ Вт, на 1 м² – 120 Вт. Включили нагрев и остановили эксперимент через 2 ч 45 мин ($t = 9,90 \cdot 10^3$ с) после того, как увидели, что во-

да с листа перестала капать в лотки. Взвесили лотки с водой, за вычетом массы лотков получили, что расплавилось 595 г снега. На его плавление затрачено $Q_{\text{п}} = \lambda \cdot m = 335 \cdot 10^3 \cdot 0,595 = 0,199 \cdot 10^6$ Дж теплоты. При этом выделившаяся теплота (на листе) $Q_{\text{л}} = P_{\text{л}} \cdot t = 180 \cdot 9,90 \cdot 10^3 = 1,78 \cdot 10^6$ Дж.



Рис. 11. Проверка полезной модели [2] (45 с после начала эксперимента)



Рис. 12. Нагревательный кабель на оцинкованном железе

Можно оценить КПД процесса – $\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{з}}} = \frac{0,199 \cdot 10^6}{1,78 \cdot 10^6} = 0,11 \approx 10 \%$, т.е.

$\frac{9}{10}$ электроэнергии было потрачено на нагрев улицы. Можно мощность на 1 м^2 умножить на площадь крыши корпуса СФ ПНИПУ, измеренную нами (примерно 1220 м^2 с учетом уклона): $120 \cdot 1220 = 146 \cdot 10^3$ Вт. Вывод – при укладке 7 м кабеля на 1 м^2 кровли мощности в 140 кВт не хватит для удаления снежного покрова толщиной всего лишь 5 см.

Следующий тепловой метод, который мы захотели проверить, – воздействие паром [9]. Для проведения экспериментов мы использовали парогенератор (пароочиститель) Karcher SC 2 с потребляемой мощностью $P = 1500$ Вт. Расход пара определяли, вычитая из массы парогенератора до работы его массу после работы. Первый эксперимент мы провели в лаборатории при температуре $+15 \dots +18 \text{ }^\circ\text{C}$, положив в алюминиевый лоток массой 0,620 кг снег массой $m_{\text{с}} = 0,955$ кг. Нажали секундомер и начали плавить снег паром, стараясь держать пистолет парогенератора как можно ближе к снегу, но так, чтобы снег не разлетался из-за струи пара (1–2 см). Процесс плавления занял 9 мин 15 с ($t = 555$ с), расход пара $m_{\text{п}}$ составил 0,355 кг, а масса лотка с водой после плавления оказалась больше массы лотка со снегом на 0,105 кг ($\approx 10 \%$ от общей массы).

Уже можно сделать вывод, что в процессе плавления приняло участие только 30 % пара, но вывод не совсем однозначный, так как могла испаряться и вода, получившаяся из снега, и наоборот, могла происходить конденсация влаги из воздуха.

При расчете теплоты, полученной от пара, мы решили пренебречь теплотой, выделяющейся при охлаждении самого пара. Хоть производитель парогенераторов и утверждает, что температура пара в бойлере 140–145 °С, но как мы ни грели термометр паром, выше 70 °С поднять не смогли.

Итак, пар отдает теплоту снегу за счет конденсации и охлаждения воды, получившейся из пара от 100 до 0 °С: $Q_3 = r \cdot m_{\text{п}} + c \cdot m_{\text{п}} \cdot \Delta T = 2260 \cdot 10^3 \cdot 0,355 + 4,186 \cdot 10^3 \cdot 0,355 \cdot 100 = 951 \cdot 10^3$ Дж, где r – удельная теплота парообразования (конденсации), $r = 2,260 \cdot 10^6$ Дж/кг [10].

На плавление снега потребовалось

$$Q_{\text{п}} = \lambda \cdot m = 335 \cdot 10^3 \cdot 0,955 = 320 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

$$\text{КПД процесса пар–снег: } \eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_3} = \frac{320 \cdot 10^3}{951 \cdot 10^3} = 0,34 = 34 \%$$

Можно в качестве затраченной считать электроэнергию, потребленную парогенератором. Процесс плавления занял 9 мин 15 с ($t_1 = 555$ с), но к этому необходимо добавить время нагрева воды в бойлере. На режим парогенератор выходил 504 с, нагревая 840 г воды, т.е. на нагрев воды для сработавшей части пара ушло $t_2 = \frac{355}{840} \cdot 504 = 213$ с. Потребленная электроэнергия

$$W = P \cdot (t_1 + t_2) = 1,5 \cdot 10^3 \cdot (555 + 213) = 1152 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Отсюда реальный КПД или КПД процесса парогенератор–снег:

$$\eta_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{п}}}{W} = \frac{320 \cdot 10^3}{1152 \cdot 10^3} = 0,28 = 28 \%$$

Второй эксперимент с использованием парогенератора провели на улице на листе железа при температуре около –4 °С. Одной заправки парогенератора не хватило, поэтому плавление пришлось проводить в два сеанса, и масса израсходованного пара $m_{\text{п}} = 1,58$ кг. От пара получено

$$Q_3 = m_{\text{п}} \cdot (r + c \cdot \Delta T) = 1,58 \cdot (2260 + 4,186 \cdot 100) \cdot 10^3 = 4,23 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Воду с листа мы собрали в лотки, ее оказалось 5,80 кг, и если предположить, что 10 % этой воды из пара (как в лаборатории), то на листе снега было $m_{\text{с}} = 5,80 \cdot 0,9 = 5,22$ кг. На плавление потребовалось

$$Q_{\text{п}} = m_{\text{с}} \cdot \lambda = 5,22 \cdot 335 \cdot 10^3 = 1,75 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

$$\text{КПД процесса пар–снег: } \eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_3} = \frac{1,75 \cdot 10^6}{4,23 \cdot 10^6} = 0,41 = 41 \text{ \%}.$$

КПД получился больше, чем в лаборатории при положительной температуре, что сомнительно. Наверное, предположение о том, что массы воды из пара и воды из снега относятся как 1:9, для улицы не совсем верно. В любом случае наша цель была оценить, а не измерить.

Процесс плавления занял 1 ч 5 мин, на нагрев воды для пара ушло около 12 мин, общее время $t = 4,62 \cdot 10^3$ с. Затраченная энергия

$$W = P \cdot t = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 4,62 \cdot 10^3 = 6,93 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Реальный КПД или КПД процесса парогенератор–снег на улице

$$\eta_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{п}}}{W} = \frac{1,75 \cdot 10^6}{6,93 \cdot 10^6} = 0,25 = 25 \text{ \%}.$$

Кроме оценки КПД эксперимент на листе железа позволил оценить плотность снега, высота которого в среднем $h = 42$ мм:

$$\rho = \frac{m_{\text{с}}}{S \cdot h} = \frac{5,22}{1,5 \cdot 0,042} = 83 \approx 80 \text{ кг/м}^3,$$

для снега, лежавшего не более недели, достоверный результат [23].

Для оценки КПД утилизации тепла от вентиляционных каналов [11–14] для таяния снега мы использовали фен Vitek мощностью 2 кВт на малой скорости. Эксперимент провели в лаборатории, температура воздуха из фена на расстоянии 4 см от сопла фена составила 50–60 °С. Снег массой $m_{\text{с}} = 0,515$ кг был расплавлен за 6 мин 58 с ($t \approx 420$ с). Теплота полезная

$$Q_{\text{п}} = \lambda \cdot m_{\text{с}} = 335 \cdot 10^3 \cdot 0,515 = 173 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Энергия, потребленная феном,

$$W = P \cdot t = 2 \cdot 10^3 \cdot 418 = 836 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

КПД процесса горячий воздух из фена – снег:

$$\eta_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{п}}}{W} = \frac{173 \cdot 10^3}{836 \cdot 10^3} = 0,21 \approx 20 \text{ \%}.$$

В следующих двух экспериментах мы проверили возможность уборки снега с крыши с помощью струи сжатого воздуха [15]. На крашеном профлисте мы испытали компрессор REMEZA 24.J1048B (мощность двигателя – 1,8 кВт, производительность – 0,26 м³/мин, максимальное давле-

ние – 0,6 МПа). На уборку снега со средней толщиной 5 см при рабочем давлении 0,2 МПа было потрачено 4 мин 20 с. На ондулине со средней толщиной снега 5,5 см мы испытали воздуходувку Echo ES-2100 (садовый пылесос) мощностью 0,510 кВт (0,7 л.с.) и производительностью при выдувании 9 м³/мин. Лист был очищен за 60 с.

Оба процесса мы снимали на видео – так проще определить время. На видео видно, что экспериментаторы, впервые в жизни держащие пистолет компрессора и воздуходувку, вторую половину листа освобождают от снега однозначно быстрее, чем первую, т.е. профессионал сделал бы это заведомо быстрее.

Последний эксперимент мы провели на оцинкованном профлисте, со средней толщиной снега 5 см. Для него мы использовали пластмассовую лопату шириной 60 см. Непрофессионал двумя движениями очистил лист от снега за 2 с.

Выводы. Однозначный вывод, который мы сделали при анализе полезной модели [2], поливать крышу горячей водой не следует.

Электронагрев и по расчетам не самый дешевый способ, и КПД оказался самым низким ($\approx 10\%$). Именно поэтому есть смысл использовать нагревательный кабель не на всей кровле, а только на карнизе. Также в желобах водостоков и водосточных трубах, в тех местах, где чаще всего образуется наледь, а сбивать ее ломом нежелательно. Если нужно гарантированное отсутствие сосулек на какой-либо части карниза, например над пешеходной дорожкой, то нагревательный кабель – самое простое и быстрое решение.

Использовать для плавления снега бесплатное тепло вентканалов [11–14] очень привлекательно, но мы не рекомендуем. КПД оказался низким ($\approx 20\%$). В эксперименте с электронагревательным кабелем КПД оказался еще ниже, и расплавить снег полностью нам не удалось. Но если уложенный кабель полностью снег не плавит, значит, этот же кабель нужно положить с меньшим шагом или взять более мощный.

Плавление снега (льда) паром оказалось достаточно длительным процессом по сравнению со сдуванием снега. Конечно, процесс можно ускорить, используя парогенератор большей мощности, но воздуходувка с двигателем мощностью, в 3 раза меньшей мощности бойлера парогенератора, освободила лист от снега в 60 раз быстрее. Однако нужно сказать, что утопанный или слежавшийся снег воздуходувка не берет, компрессором можно откинуть плотный снег, если рыхлить его пистолетом. Преимущество парогенератора в том, что ему все равно, что плавить, снег или лед. Но лучше плавить лед, снег заведомо дешевле и быстрее сдуть.

Сдувание снега – самый быстрый из исследуемых нами способов, но медленнее традиционной уборки лопатой. Кроме того, снег сжатым воздухом отбрасывается примерно на 0,5 м, максимум на 1 м. Лопатой отбросите на порядок дальше. Конечно, можно использовать компрессор больших мощности и производительности, но как затащить его на чердак, если размер лаза 0,61×0,69 м. Наверное, есть смысл использовать данный способ на крутых крышах, по которым неудобно ходить. Оператор сможет, передвигаясь по коньку, опускаться по скату «гибкий шланг с трубчатым наконечником».

В заключение можно сказать, что быстрее, эффективнее и экономичнее традиционного способа уборки снега лопатой нет.

Библиографический список

1. Способ предотвращения образования наледей и сосулек на чердачных крышах: пат. 2467138 Рос. Федерация: МПК E04D 13/17 / Н.А. Седых, В.П. Занин, И.М. Руднев. – № 2011106529/03; заявл. 21.02.2011; опубл. 20.11.2012. – Бюл. № 32.
2. Устройство для удаления наледи и сосулек с крыш: пат. 136067 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / В.А. Сычев. – № 2012154170/03; заявл. 13.12.2012; опубл. 27.12.2013. – Бюл. № 36.
3. Устройство для удаления снега и льда с крыш зданий и сооружений: заявка на изобр. № 2004137335/03 Рос. Федерация: МПК E04D 13/00 / В.Б. Ермолин, И.М. Рукина. – заявл. 21.12.2004; опубл. 10.06.2006.
4. Установка для таяния снега: пат. 2339759 Рос. Федерация: МПК E01H 5/10 / А.И. Холинов, А.В. Харихин, В.К. Екимов. – № 2007105089/11; заявл. 12.02.2007; опубл. 27.11.2008. – Бюл. № 33.
5. Приспособление для обогрева свесов кровли: пат. 30417 СССР: МПК E04D 13/076 / Н.П. Рагозин. – № 104317; заявл. 27.02.1932; опубл. 31.05.1933.
6. Устройство для удаления льда с водостоков крыш зданий и сооружений: пат. 2209904 Рос. Федерация: МПК E04D 13/00 / М.В. Халин, Т.М. Халина, Г.А. Пугачев, В.Л. Тарабанов, В.Ю. Марсов, М.Н. Строков, Р.Н. Белоусов, А.В. Жуйков. – № 2002102526/03; заявл. 28.01.2002; опубл. 01.28.2002. – Бюл. № 22.
7. Устройство для удаления снега и льда с карнизного свеса крыши: пат. 2209903 Рос. Федерация: МПК E04D 13/00 / К.Х. Юсупов, А.И. Чудновский, Н.Д. Шилов, М.Н. Ершов. – № 2001134153/03; заявл. 19.12.2001; опубл. 10.08.2003 – Бюл. № 22.
8. Устройство для удаления снега и льда с карнизного свеса крыши: пат. 2392398 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / Э.А. Ахадов, Г.Н. Бондаренко, С.А. Новиков, О.В. Саломатин, А.И. Симонович, Г.Н. Степанчук, А.А. Трусов, В.П. Хлопков, Т.В. Чяснавичене, Т.Г. Шиндина, Г.Н. Янченко. – № 2009115991/03; заявл. 28.04.2009; опубл. 20.06.2010. – Бюл. № 17.
9. Способ удаления снега и льда с крыши: пат. 2457305 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / В.Г. Кулешов, Л.М. Трубицына. – № 2011111311/03; заявл. 25.03.2011; опубл. 27.07.2012. – Бюл. № 21.
10. Физические величины: справ. / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.], под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
11. Устройство для предотвращения образования сосулек: пат. 2301311 Рос. Федерация: МПК E04D 13/00 / П.А. Зайченко, П.В. Дружинин, А.Н. Агафонов, А.Д. Савчук. – № 2006103536/03; заявл. 06.02.2006; опубл. 20.06.2007. – Бюл. № 17.
12. Антиобледенительное устройство для крыш: пат. 2340746 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / В.И. Попов. – № 2006147059/03; заявл. 27.12.2006; опубл. 10.12.2008. – Бюл. № 34.

13. Устройство для устранения снега, наледи и сосулек: пат. 2570582 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / В.Б. Беляев. – № 2014116928/03; заявл. 25.04.2014; опубл. 10.12.2015. – Бюл. № 34.
14. Антиобледенительное устройство для крыш: пат. 2441122 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / В.И. Попов. – № 2010112543/03; заявл. 31.03.2010; опубл. 27.01.2012. – Бюл. № 3.
15. Способ уборки снега с крыши здания: пат. 2459054 Рос. Федерация: МПК E04D13/076 / Ю.Д. Тарасов. – № 2010142144/03; заявл. 13.10.2010; опубл. 20.08.2012. – Бюл. № 23.
16. Устройство для уборки снега с крыши здания: пат. 2451140 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / Ю.Д. Тарасов. – № 2010142620/03; заявл. 18.10.2010; опубл. 20.05.2012. – Бюл. № 14.
17. Устройство для уборки снега с крыши здания: пат. 2459053 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / Ю.Д. Тарасов. – № 2010142143/03; заявл. 13.10.2010; опубл. 20.08.2012. – Бюл. № 23.
18. Устройство для удаления сосулек и очистки снега с козырьков крыш зданий для периодической очистки: пат. 2592304 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / С.В. Умрихин. – № 2015118642/03; заявл. 19.05.2015; опубл. 20.07.2016. – Бюл. № 20.
19. Устройство для удаления снега: пат. 2457304 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / И.А. Левин. – № 2011101755/03; заявл. 19.01.2011; опубл. 27.07.2012. – Бюл. № 21.
20. Краткий курс общей физики: учеб. пособие / Ю.А. Барков, Г.Н. Вотинов, О.М. Зверев, А.В. Перминов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 406 с.
21. Агрегат для уборки наледи и снега: пат. 2499108 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / Ю.А. Пак. – № 2012104188/03; заявл. 07.02.2012; опубл. 20.11.2013. – Бюл. № 32.
22. Устройство для удаления снега и наледи: пат. 2502854 Рос. Федерация: МПК E04D 13/076 / С.Х. Бегишев, А.В. Кислов, Л.В. Петрусев. – № 2012114746/03; заявл. 10.04.2012; опубл. 27.12.2013. – Бюл. № 36.
23. Снег: справ. / под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.

References

1. Sedykh N.A., Zanin V.P., Rudnev I.M. Sposob predotvrashcheniya obrazovaniya naledey i sosulek na cherdachnykh kryshakh [A method for preventing the formation of ice and icicles in attic roofs]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2467138 (2012).
2. Sychev V.A. Ustroystvo dlya udaleniya naledi i sosulek s krysh [the Device for removal of ice dams and icicles from the roofs]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 136067 (2013).
3. Ermolin V.B., Rukina I.M. Ustroystvo dlya udaleniya snega i l'da s krysh zdaniy i sooruzheniy [the Device for removing snow and ice from the roofs of buildings and structures]: Ros Federatsiia: MPK E04D 13/00/ No. 2004137335/03; zaiavlenn 21.12.2004; opublikovan 10.06.2006.
4. Kholinov A.I., Kharykhin A.V., Ekimov V.K. Ustanovka dlya tayaniya snega [Snow melting machine]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2339759 (2008).
5. Ragozin N.P. Prispособleniye dlya obogrevaniya svesov krovli [The device for heating roof overhangs]. Patent USSR no. 30417 (1933).
6. Khalin M.V., Khalina T.M., Pugachev G.A., Tarabanov V.L., Marsov V.YU., Stokov M.N., Belousov R.N., Zhuikov A.V. Ustroystvo dlya udaleniya l'da s vodostokov krysh zdaniy i sooruzheniy [The device for removing ice from roof gutters of buildings and structures]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2209904 (2002).
7. Yusupov K.H., Chudnovsky A.I., Shilov N.D., Ershov M.N. Ustroystvo dlya udaleniya snega i l'da s karniznogo svesa kryshi [a Device for removing snow and ice from the eaves of the roof]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2209903 (2003).
8. Ahadov E.A., Bondarenko G.N., Novikov S.A., Salomatin O.V., Simonovich A.I., Stepanchuk G.N., Trusov A.A., Khlopov V.P., Chasnaviciene T.V., Shindina T.G., Yanchenko G.N. Ustroystvo dlya udaleniya snega i l'da s karniznogo svesa kryshi [the Device for removing snow and ice from the eaves of the roof]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2392398 (2010).
9. Kuleshov V.G., Trubitsyna L. M. Sposob udaleniya snega i l'da s kryshi [the Method of removing snow and ice from the roof]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2457305 (2012).

10. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkjvskiy A.M. [et al.]. Pod red. Grigor'eva I.S., Meylihofv E.Z. *Physicheskie velichiny: Spravochnik* [The manual of physical quantity]. Moscow: Energoizdat, 1991. 1232 p.
11. Zaichenko P.A., Druzhinin P.V., Agafonov A.N., Savchuk A.D. *Ustroystvo dlya predotvrashcheniya obrazovaniya sosulek* [the Device for the prevention of the formation of icicles]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2301311 (2007).
12. Popov V.I. *Antiobledenitel'noye ustroystvo dlya krysh* [The anti-icing device for roofs]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2340746 (2008).
13. Belyaev V.B. *Ustroystvo dlya ustraneniya snega, naledi i sosulek* [the Device for removing snow, ice and icicles]. 2570582 (2015).
14. Popov V.I. *Antiobledenitel'noye ustroystvo dlya krysh* [The anti-icing device for roofs] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2441122 (2012).
15. Tarasov Y.D. *Sposob uborki snega s kryshi zdaniya* [the Method of snow removal from the roof of the building]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2459054 (2012).
16. Tarasov Y.D. *Ustroystvo dlya uborki snega s kryshi zdaniya* [The device for cleaning snow from the roof of the building]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2451140 (2012).
17. Tarasov Y.D. *Ustroystvo dlya uborki snega s kryshi zdaniya* [The device for cleaning snow from the roof of the building]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2459053 (2012).
18. Umrikhin S.V. *Ustroystvo dlya udaleniya sosulek i ochistki snega s kozyr'kov krysh zdaniy dlya periodicheskoy ochistki* [the Device for removing icicles and cleaning snow from the roofs of roofs of buildings for periodic cleaning]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2592304 (2016).
19. Levin I.A. *Ustroystvo dlya udaleniya snega* [The device for removing snow]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2457304 (2012).
20. Barkov Y.A., Votinov G.N., Zverev O.M., Perminov A.V.. *Kratkiy kurs obshchej fiziki* [Short course of general physics]. Perm': Izdatel'stvo PNIPIU, 2015. 406 p.
21. Pack Yu.A. *Agregat dlya uborki naledi i snega* [The unit for cleaning ice and snow]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2499108 (2013).
22. Begishev S.H., Kislov A.V., Petrushev L.V. *Ustroystvo dlya udaleniya snega i naledi* [the Device for removing snow and ice]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2502854 (2013).
23. Pod red. Grey D.M., Meil D.H. *Sneg: Spravochnik* [the Snow]. L: Gidrometeoizdat, 1986, 751 p.

Получено 9.01.2018

L. Zadorina, V. Muratova, V. Golubev, O. Zverev

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF METHODS AND DEVICES FOR SNOW REMOVAL FROM PITCHED ROOFS

Various methods and devices for cleaning and removal of snow from pitched roofs have been studied. A method of snow removal can be passive, implying that the roof itself is constructed in such a way that the falling snow rolls down automatically; either it can be active, when the snow is shoveled, blown off or melted. In the review the possibility of using a wide range of methods and devices for snow removal is discussed. The observed methods and devices can be divided into two groups: thermal and mechanical. The conducted theoretical analysis allowed calculating the minimum cost of cleaning of a square meter of the roof with hot water, by means of heat networks, electric heating, steam and by hand. The experimental analysis has been carried out in a laboratory and based on roof models. The analysis allowed determining the feasibility, energy consumption and snow removal rate for a wide range of methods and devices. Watering roofs with hot water is ineffective, because it does not guarantee washing out of all the snow and requires a subsequent catchment. The lowest efficiency (0.1) was observed when the roof was heated by an electric cable. The efficiency of the process of snow melting with warm air from the ventilation ducts is

0.2. When the steam is used, not more than one-third of the energy used for steam generation is utilized in the melting process, and the melting process is too slow. Blowing off the snow with a jet of compressed air is ten times faster, but it is still slower than traditional shoveling.

Keywords: snow removal, snow cleaning, pitched roof, heating cable, steam generator, compressor.

Задорина Лидия Вадимовна (Пермь, Россия) – студентка строительного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lida14071998@mail.ru).

Муратова Виктория Андреевна (Пермь, Россия) – студентка строительного факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mva-98-vika@mail.ru).

Голубев Виктор Алексеевич (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dekstf@pstu.ru).

Зверев Олег Михайлович (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ckko-smt2@pstu.ru).

Zadorina Lidia (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: lida14071998@mail.ru).

Muratova Viktoriia (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: mva-98-vika@mail.ru).

Golubev Viktor (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of building Engineering and Materials, Perm National Research Polytechnic University (614010, Perm, Kuibyshev str., 109, e-mail: dekstf@pstu.ru).

Zverev Oleg (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: ckko-smt2@pstu.ru).