

Ким К. К., Иванов С. Н., Дружинин В. А., Шевченко Я. Е., Азимов Х. Х.
K. K. Kim, S. N. Ivanov, V. A. Druzhinin, Y. E. Shevchenko, Kh. Kh. Azimov

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

MODELING OF STRESSES IN ICE FORMATION ELEMENTS UNDER MECHANICAL LOADING

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Ave., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Дружинин Владимир Александрович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@knastu.ru.

Vladimir A. Druzhinin – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@knastu.ru.

Шевченко Яна Евгеньевна – студент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: das@knastu.ru.

Yana E. Shevchenko – Student, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: das@knastu.ru.

Азимов Хурсандмурод Хакимович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Khursandmurod Kh. Azimov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. Рассмотрена актуальность разработки электромеханической системы на основе анализа результатов имитационного моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов льдообразования. Приведён обзор используемых на практике методов и конструктивных решений, направленных на решение рассматриваемой задачи. Проанализированы теоретические процессы образования наледи. Предложен новый подход реализации системы с использованием непосредственного асинхронного привода возвратно-поступательного движения. Приведена методика определения мощности привода электромеханической системы с учётом закона распределения удаляемых элементов и «модели слабейшего звена».

Summary. The relevance of electromechanical system development based on the analysis of the results of simulation of the stress-strain state of the elements of ice formation is considered. An overview of the methods used in practice and constructive solutions aimed at solving the problem under consideration is given. The theoretical processes of ice formation are considered. A new approach to the implementation of the system using a direct asynchronous recipro-

cating drive is proposed. A method for determining the drive power of an electromechanical system is given, taking into account the distribution law of the elements to be removed and the «weakest link model».

Ключевые слова: моделирование, льдообразование, электромеханическая система, напряжённо-деформированное состояние.

Key words: modeling, ice formation, electromechanical system, stress-strain state.

УДК 621.313:621.317.39

Введение. Одной из актуальных проблем, которым уделяется постоянное внимание со стороны самых различных организаций, является образование на карнизах и водостоках крыш сосулек, представляющих опасность для всего, что находится под ними. Свисающая наледь нередко становится причиной травмирования проходящих мимо людей, а иногда и летальных исходов. Ежегодно жертвами сосулек становятся от 500 до 2000 человек по всему миру [1–3]. Это также наносит существенный ущерб имуществу в виде обрушения крыш, козырьков, водосточных труб, нанесения повреждений припаркованным автомобилям. Для примера, Хабаровский край занимает 3-е место среди регионов, где автовладельцы заявляли об ущербе, нанесённом автомобилям вследствие падения снега и льда в 2020-2021 годах.

Причины образования сосулек можно разделить на две категории: естественные и искусственные [4; 5]. К естественным причинам относятся суточные колебания температур, т. е. днём температура переходит нулевой порог и снег на крыше начинает подтаивать, а ночью талая вода снова замерзает, тем самым образуя наледь. К искусственным причинам относится плохая теплоизоляция крыши, из-за чего тёплый воздух из помещений способствует таянию снега и его последующему замерзанию ночью. Отличие состоит лишь в том, что при плохой теплоизоляции процесс образования наледи происходит круглосуточно, что делает её объём ещё больше.

Воздействие льда может быть катастрофическим не только для природных, но и для гражданских и промышленных объектов, что указывает на то, что проблема обледенения, точнее устранение последствий этого процесса, является актуальной для большинства объектов любой инфраструктуры.

Благодаря своим физическим свойствам лёд может разрушать оборудование, негативно воздействовать на строительные конструкции и со временем нарушать их целостность и делать их небезопасными. Обледенение может ухудшить аэродинамические свойства летательных аппаратов и тем самым привести к аварии, под собственным весом оборвать провода и привести к отключению электроэнергии, нарушить работу газоперекачивающих станций и гидрозатворов. Как отмечено выше, даже падая с крыши здания, лёд способен повредить припаркованные вблизи здания автомобили или нанести серьёзный вред здоровью людей.

Кроме того, скопление льда на крыше может вызвать значительные нагрузки на её конструкцию, а забитые льдом водостоки могут повредить верхние элементы здания.

В настоящее время для борьбы с обледенением используется много различных методов. Основным, который применяется в железнодорожной практике, является термический метод, заключающийся в удалении наледи с поверхности путём её нагрева. Данный метод в большинстве случаев имеет высокое энергопотребление, а в случае очистки крыш нагревательные устройства сами по себе имеют высокую стоимость. Поэтому при удалении наледи чаще обходятся механическим методом, вручную удаляя образовавшуюся наледь.

Теоретический процесс льдообразования. Образование льда происходит в результате скопления влаги, подвергшейся воздействию низкой температуры. Существуют классический и альтернативный механизмы, которые поясняют принцип образования льда. Классический подход предполагает таяние снежинок из более холодных слоёв облаков в более тёплых, и затем их повторное охлаждение ниже 0 °С в более низком, холодном слое, из-за чего они выпадают в виде переохлаждённых капель. Альтернативный механизм представляет собой столкновение и последующее соединение облачных капель при температурах немного ниже нуля, что приводит к образованию замерзающих осадков.

На состояние жидкой воды влияет множество факторов, в том числе материал и температура поверхности, на которой она находится. Существуют три режима образования льда: жидкий, влажный и сухой. При температуре поверхности не ниже $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ образования льда путём кристаллизации не произойдёт. Если температура будет оставаться чуть выше точки замерзания, то вода останется в виде капель. Таким образом, лёд будет либо таять, либо вообще не будет образовываться – это жидкий режим. При влажном режиме льдообразования температура поверхности должна быть равна температуре замерзания воды, при этом изменяется доля замерзающей жидкости. Сухой режим отличается от прошлых двух режимов отсутствием воды и температурой ниже нуля [2; 3].

На скорость процесса обледенения и величину образовавшейся наледи влияет множество факторов, к ним относятся: размер капель жидкости, температура поверхности, влажность и температура воздуха, солёность воды, присутствие определённых химических веществ или частиц в атмосфере, наличие ранее существовавшего льда, а также его температура. Температура принимается наиболее важным фактором, т. к. она определяет, когда молекулы в воде замедляются настолько, чтобы образовать кристаллы. Воздушный поток также существенно влияет на скорость, с которой молекулы воды могут перемещаться. Кроме этого, наличие некоторых химических веществ или частиц в атмосфере может влиять на способ образования льда, катализировать или изменять форму образующихся кристаллов.

Процесс обледенения можно рассматривать как происходящий поэтапно [5]. Первая стадия характеризуется столкновением капель воды с поверхностью объекта. Эффективность этого столкновения зависит от коэффициента захвата, на который влияет форма и размер капель, скорость потока воздуха, а также размер и форма самого объекта, подвергающегося обледенению.

Второй этап процесса заключается в удержании капли на поверхности. Этот этап зависит от суммарного объёма жидкости, покидающего поверхность обледенения. На сухой поверхности, температура которой ниже температуры замерзания воды, капли быстро замерзают и остаются на месте. При наличии на поверхности влаги капля также не отскакивает, но часть её всё же уходит с поверхности. Несмотря на недостаточную эффективность прилипания сухого снега известны результаты исследования, когда сухой снег прилипал к поверхности при скорости ветра менее 2 м/с , из-за чего образовывалась налесь [2]. Таким образом, снег налипает более эффективно на влажные поверхности при определённой температуре и относительно низких скоростях соударения.

Третий этап – кристаллизация капли, его можно разделить на несколько стадий, начиная с образования мельчайших микрокристаллов льда и заканчивая быстрым формированием структуры лёд-жидкость и переходом в состояние температурного баланса при температуре затвердевания. Далее следует более медленный процесс полного замерзания. Часть капли замерзает, и в результате переохлаждённая жидкость нагревается до температуры затвердевания и замерзает оставшаяся часть жидкости. В работе [5] показано, что на поверхности с отрицательной температурой замерзание капли воды с температурой $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит за несколько секунд. Для крупных капель потребуется немного больше времени для затвердевания. При переохлаждённом дожде образование льда может занять значительно больше времени, т. к. процессу замерзания препятствует соединение капель воды на поверхности с каплями, только попавшими на поверхность, это связано с аккумулярованной в них теплотой, повышающей температуру воды.

Образование льда – многоэтапный и довольно сложный процесс, который зависит от параметров окружающей среды и температуры поверхности, причём чем ниже температура поверхности, тем быстрее увеличивается налесь. Первичные элементы льдообразования в зависимости от режима намерзания могут начать образовываться всего за минуты при соответствующих скоростях ветра, температурах поверхности и окружающей среды.

Моделирование напряжений в элементах льдообразования. Для предотвращения образования и удаления наледи в настоящее время применяются различные методы и способы. Из существующих методов следует выделить два основных, связанных с тепловым и механическим воздействием на элементы льдообразования. Количество реализуемых способов существенно больше и связано с многочисленными конструкциями и технологиями, применяемыми для удаления льда.

Самым простым, но при этом достаточно результативным, является ручной способ. В этом случае лёд сбивается вручную при помощи вспомогательного инструмента, часто с использованием альпинистского снаряжения, которое обеспечивает необходимый доступ, или с применением спецтехники, например автомобильного подъёмника. Это один из наиболее опасных для исполнителей вариантов.

Удаление сосулек пневматическим оружием также опасный способ, требующий обязательной регистрации оружия, установки ограждения и наличия охраны.

Существуют способы устранения льда лазером, электрическим импульсом и ультразвуком. Вследствие высокой стоимости они применяются редко.

Более безопасными могут считаться способы, связанные с применением специальных антиобледенительных систем, например, использующих теплогенерирующие кабели. Система включает в себя устройство управления, крепёжные элементы, греющие секции из резистивного или саморегулирующегося кабеля и распределительную сеть. На такой основе предложена реализация в виде устройства, использующего гибкие элементы, подключённые к электрическому кабелю.

Ещё один, но редко используемый способ основан на воздействии пара и заключается в облегчённом отделении льда от крыши. Пар под давлением, создаваемым при помощи снабжённого шлангом газового баллона, разрушает лёд, и последний отделяется от поверхности.

В качестве конкретных технических решений может быть рассмотрено устройство для устранения снега, наледи и сосулек с крыш зданий [6]. Оно содержит вентилятор, который через сопло засасывает воздух из-под крыши и перемещает его через эжектор, обеспечивающий условия для всасывания тёплого воздуха и создания его избыточного давления.

В работе [7] предложено устройство, содержащее низковольтные вибрационные электродвигатели, действующие на элементы льдообразования.

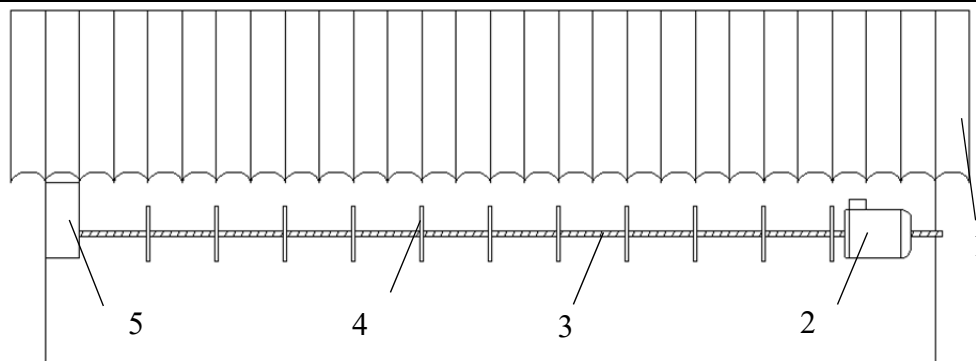
Анализ основных направлений разработки рассматриваемых технических систем показывает, что наиболее перспективным является переход на автоматизированные системы с механическим воздействием на элементы льдообразования.

Одно из эффективных решений, связанное с созданием автоматических комплексов для удаления наледи с крыш зданий, основано на применении непосредственных электромеханических преобразователей возвратно-поступательного движения [8].

Техническая реализация, принцип действия и особенности проектирования таких устройств описаны в [9–12].

На рис. 1 показан общий вид электромеханического устройства для очистки крыши от сосулек. В ротор асинхронного электродвигателя встроена винтовая передача, которая обеспечивает осевое перемещение исполнительного механизма (тяги) в зависимости от направления вращения двигателя. На тяге расположены лопатки произвольной формы, обеспечивающие при линейном смещении достаточное для разрушения льда усилие. Конструкция включает опорные элементы, не только удерживающие тягу при воздействии изгибающих нагрузок, но и препятствующие её тангенциальному (вращательному) перемещению.

Электромеханическая система предназначена для удаления элементов льдообразования с крыш зданий 1 в автоматическом режиме. Управляющим сигналом является видеoinформация, поступающая с датчика контроля образования сосулек (например, видеокамеры), с использованием способа идентификации, основанного на сравнении информации о параметрах льдообразования, поступающей из видеопотока, например линейного размера сосулек, и сравнение полученной информации с заранее заданными значениями, внесёнными в базу данных системы управления. Далее результат обработки полученной информации и информации, хранящейся в базе данных команд системы управления, формируется в управляющую команду для электромеханического преобразователя 2. После формирования и получения управляющей команды автоматическая электромеханическая система в зависимости от сформированной устройством управления управляющей команды получает напряжение от источника питания. Это приводит к движению вращающейся вторичной обмотки и осевому перемещению тяги 3, на которой расположены лопатки 4, которые, перемещаясь вдоль крыши, удаляют сосульки. Отдельная задача, не рассматриваемая в данной статье, связана с выбором формы лопаток.



1 – крыша; 2 – электродвигатель; 3 – шнек; 4 – лопатки; 5 – опора

Рис. 1. Общий вид электромеханического устройства для очистки крыши от сосулек

Примеры внешнего исполнения предлагаемой системы для удаления льда, учитывающие архитектурные особенности строений, показаны на рис. 2.

Система управления формирует реверсивный режим работы электромеханического преобразователя, обеспечивающий возвратно-поступательное перемещение лопаток вдоль крыши. Опора скольжения 5 допускает линейное осевое (вдоль крыши) движение тяги и, соответственно, лопаток, но препятствуют их тангенциальному (вращательному) перемещению.

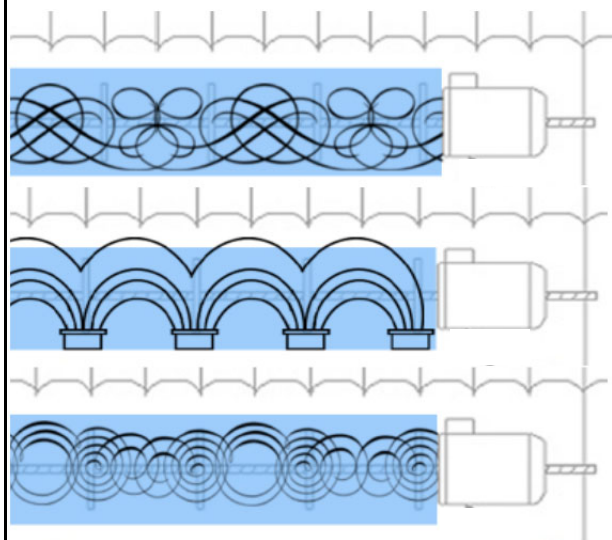


Рис. 2. Варианты внешнего исполнения системы для удаления льда

Качество и характеристики энергоэффективности системы льдоудаления непосредственно зависят от мощности двигателя, которая должна быть определена с учётом реальных эксплуатационных нагрузок.

Исходной информацией для проектирования электропривода приняты результаты имитационного моделирования нагружения элементов льдообразования в условиях упругой деформации в пакете Comsol Multiphysics в виде перемещений (см. рис. 3) и напряжений (см. рис. 4). При моделировании в качестве объекта разрушения выбирается элемент с детерминированной геометрией, для которого определяются механические напряжения при вариации места приложения сосредоточенной нагрузки со стороны тяги (шнека).

На рис. 2 показаны величины перемещений при вариации областей приложения внешней нагрузки, например, позиция на рис. 2, *a* соответствует усилию в области наибольшего сечения, позиция на рис. 2, *z* – в зоне минимального.

На рис. 3 приведены величины напряжений при аналогичных нагрузках: на рис. 3, *a* – в области наибольшего сечения, позиция на рис. 3, *z* – в зоне минимального.

Анализ результатов моделирования позволяет найти величины напряжений, возникающих на различном удалении от основания исследуемого элемента (см. рис. 5), определяющие требуемую мощность для его разрушения.

Необходимо отметить, что место приложения усилия должно соответствовать требованию безопасного удаления льда для объектов, попадающих в зону их возможного падения.

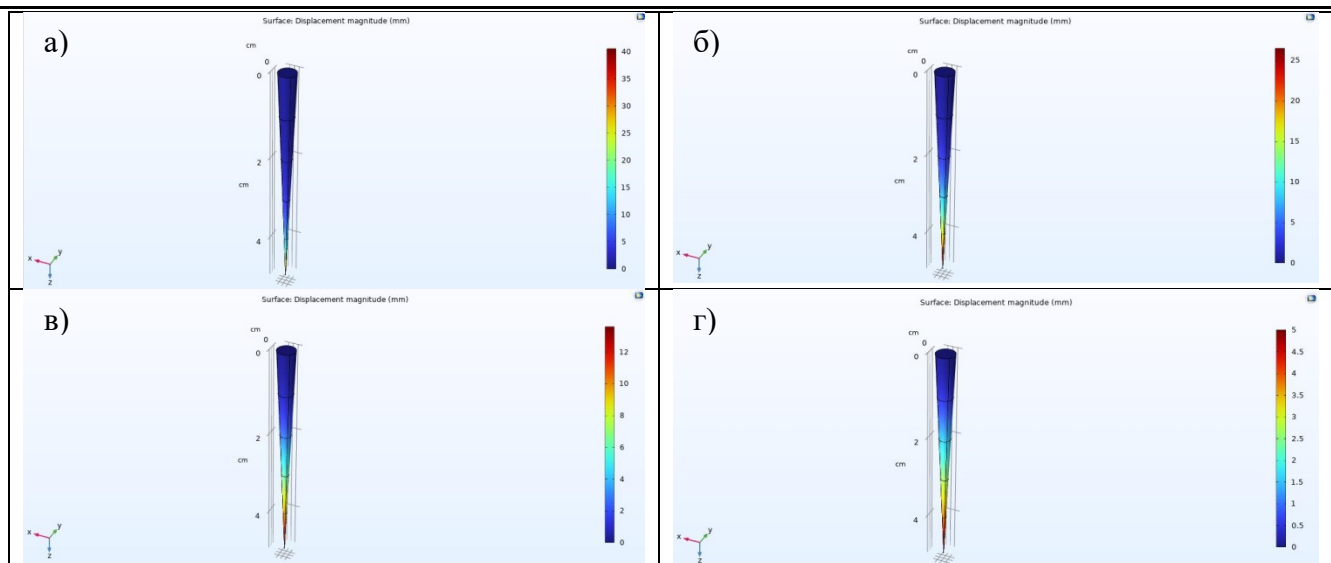


Рис. 3. Величины перемещений при упругой деформации

Для определения мощности двигателя необходимо связать длину покрытой льдом части и необходимую для её удаления удельную мощность. Очевидно, что разрушение будет происходить последовательно, начиная с любого наиболее нагружаемого из элементов, поэтому минимальная расчётная мощность двигателя P_{\min} должна незначительно превышать мощность, необходимую для удаления отдельной сосульки, т. е. удельную мощность, отнесённую на расстояние между двумя смежными лопатками.

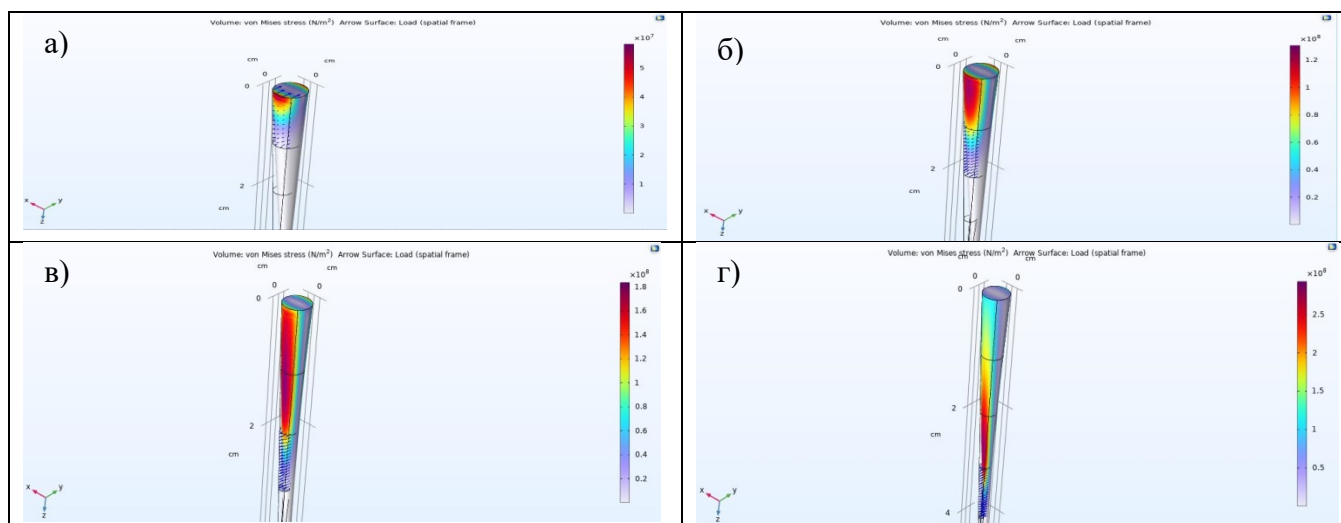


Рис. 4. Величины напряжений

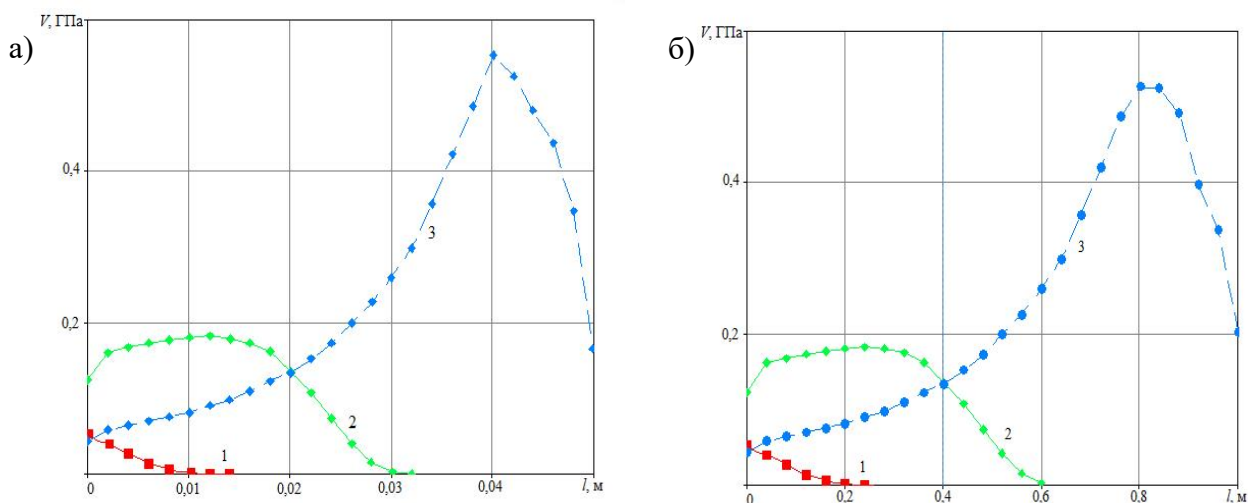
Поскольку процесс льдообразования носит случайный характер, то при выборе расчётной мощности можно использовать два подхода.

Первый предполагает наличие генеральной совокупности статистических данных и даёт возможность определения количества одновременно удаляемых элементов на основе одного из законов распределения, например, нормального. Это представляет сложную научную задачу, т. к. при строгой постановке задачи требует учёта фазового перехода материала исследуемого объекта.

В основу второго подхода может быть положена модель «слабейшего звена», которая часто применяется для оценки надёжности сложно моделируемых технических систем [13]. В этом случае рассматривается система, состоящая из n последовательных удаляемых элементов, причём удаляется сначала самый нагружённый элемент, затем следующий по степени нагружения и т. д.

Использование такой модели позволяет существенно упростить определение требуемой мощности двигателя и одновременно обеспечивает приемлемую точность. В качестве «слабейшего звена» может быть принят произвольный элемент, а задача определения требуемой мощности будет формулироваться следующим образом: найти вероятность того, что приложенное напряжение превысит механическую прочность элемента. Далее рассматриваются плотность функции распределения приложенного напряжения $f(\sigma)$ и плотность распределения прочности удаляемых элементов $f(E)$. Очевидно, что если на заданном интервале прочность выше напряжения, то разрушения не происходит. Вероятность безотказной работы элемента записывается в виде

$$P_{\text{эл}}(t) = P_1(E > \sigma).$$



1 – усилие приложено к основанию; 2 – усилие приложено к середине элемента;
3 – усилие приложено в области вершины

Рис. 5. Величины напряжений при различной длине элементов: а – 0,05 м; б – 1,0 м

Вероятность того, что напряжение принадлежит заданному интервалу $d\sigma$, а прочность E превышает значение напряжения, определяется как произведение вероятностей:

$$P(\sigma \in d\sigma \cap E > \sigma) = f(\sigma)d\sigma \int_{d\sigma/2}^{\infty} f(E)dE.$$

Вероятность неразрушения любого элемента определится аналогично при подстановке реальных пределов интегрирования:

$$P_{\text{эл}}(t) = \int_0^{\infty} \int_{\sigma}^{\infty} f(\sigma)f(E)dEd\sigma.$$

Используя аналогию с работой механических сопряжений, можно допустить, что количество одновременно удаляемых элементов не превышает трёх. Соответственно, требуемая расчётная мощность двигателя будет определяться как $3P_{\text{min}}$, или приближённо

$$P_{\text{расч}} \approx 3 P_{\text{min}} = 3M_{\text{эм}}\omega_2.$$

В этом выражении электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, развиваемый электромеханическим преобразователем (асинхронным двигателем), может быть найден как

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1\Delta U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left((r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2 \right)},$$

где p – число пар полюсов; m_1 – число фаз; ΔU_1 – изменение напряжения вследствие перемещения объекта измерения; c_1 – численный коэффициент приведения схемы замещения; ω – угловая частота; r_1, r_2' – активные сопротивления; $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$ – индуктивные сопротивления статора и ротора двигателя.

Зная мощность двигателя, можно решить и обратную задачу: найти величину силы, воздействующей на удаляемый объект, которая в общем случае может быть найдена на основании уравнения Лагранжа первого рода [14]:

$$m_v \cdot w_v = F_v \sum_{\alpha=1}^r \lambda_{\alpha} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial r_v} + \sum_{\beta=1}^r R_v,$$

где m_v – масса объекта; w_v – ускорение объекта; F_v – равнодействующая сила; R_v – реакция силы. Величина силы, соответственно,

$$F_v = P_{\text{расч}}/v,$$

где v – линейная скорость перемещения тяги, м/с.

Заключение. Полученные в результате моделирования величины напряжений являются основой для выбора размерных соотношений и номинальных параметров привода системы удаления элементов льдообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ удаления гололёда с проводов линий электропередач / С. И. Сухоруков, Д. А. Орлов, В. А. Соловьев, В. М. Козин // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 54-56.
2. Ратушняк, В. С. Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ратушняк Валентина Сергеевна. – Иркутск, 2021. – 178 с.
3. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
4. Алексеенко, С. В. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчётов / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // Учёные записки ЦАГИ. – 2013. – № 6 (XLIV). – С. 25-57.
5. Mishchenko, L. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, V. Hatton, V. Bahadur et al. // American Chemical Society. – 2010. – № 4 (12). – P. 7699-7707.
6. Патент № 2570582 Российская Федерация, МПК E04D 13/076 (2006.01). Устройство для устранения снега, наледи и сосулек с крыш зданий: № 2014116928/03: заявлено 25.04.2014; опубликовано 10.12.2015 / Беляев В. Б.; заявитель и патентообладатель Беляев Виктор Борисович. – 2 с.
7. Патент № 194796 Российская Федерация, МПК E04D 13/076 (2006.01). Устройство автоматического сброса наледи и сосулек с козырьков кровли: № 2019131155: заявлено 03.10.2019; опубликовано 24.12.2019 / Каретный А. А.; заявитель и патентообладатель Каретный Александр Анатольевич. – 2 с.
8. Совмещённые электрические машины для автоматизации / Ю. М. Келим [и др.]; под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объектного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
10. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
11. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – P. 36-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
12. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
13. Иванов, С. Н. Надёжность электроснабжения: учеб. пособие / С. Н. Иванов, А. А. Скрипилев. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 164 с.
14. Лидов, М. Л. Курс лекций по теоретической механике / М. Л. Лидов. – М.: Физматлит, 2010. – 495 с.