

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 3 / 2023, Vol. 15, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/58SAVN323.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Васильев, А. С. Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния снегового и ледяного наката при его разрушении под воздействием предложенного устройства / А. С. Васильев, В. Л. Земляк, Н. В. Протасов, Д. Э. Бабашов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/58SAVN323.pdf>

For citation:

Vasilyev A.S., Zemlyak V.L., Protasov N.V., Babashov D.E. Numerical modeling of the stress-strain state of snow and ice run-up during its destruction under the influence of the proposed device. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(3): 58SAVN323. Available at: <https://esj.today/PDF/58SAVN323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Исследование выполнено за счёт гранта Департамента образования Еврейской автономной области в соответствии с распоряжением губернатора Еврейской автономной области от 28.04.2022 № 124-рз

УДК 624.1

ГРНТИ 30.19.02; 30.19.31

Васильев Алексей Сергеевич

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
Доцент кафедры «Технических дисциплин»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: vasil-grunt@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=896244
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203895897>

Земляк Виталий Леонидович

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
Доцент кафедры «Технических дисциплин»
Кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: vellkom@list.ru

Протасов Николай Валерьевич

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
Аспирант кафедры «Технических дисциплин», инженер-исследователь
E-mail: vellkom@list.ru

Бабашов Даниэль Эльманович

ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема», Биробиджан, Россия
E-mail: daniel.babashov2020@mail.ru

Численное моделирование напряжённо-деформированного состояния снегового и ледяного наката при его разрушении под воздействием предложенного устройства

Аннотация. В зимнее время года наблюдается рост травматизма и дорожно-транспортных происшествий вследствие возникновения на дорогах с твёрдым покрытием ледяного и ледяного наката. Очистка дорожных покрытий от наката включает в себя две технологические операции: его разрушение и транспортировку образовавшихся фрагментов. Основным процессом, определяющим производительность очистки, является процесс резания, т. е. отделение от дорожного покрытия фрагментов наката режущим

инструментом специальных машин. Целью работы является моделирование процесса разрушения ледяного наката под воздействием разработанного авторами устройства. Моделирование разрушения ледяного наката — задача достаточно сложная и нетривиальная.

Применяется обновлённая модель Лагранжа, реализованная в современном программном комплексе. В результате разработан алгоритм на основе численной модели, реализованной в программном комплексе ANSYS, для определения напряженно-деформированного состояния ледяного наката от внедрения в него дисковых ножей. Анализ напряженно-деформированного состояния наката показывает, что наибольшие перемещения частиц наката происходят по контуру (периметру) дисков и на поверхности покрытия. Наибольшие эквивалентные напряжения наблюдаются по контуру дисков (периметру). Средняя часть диска (приближаясь к центру) практически не участвует в работе устройства. Наибольшее перемещение частиц наката происходит по контуру диска, по краям же они почти нулевые.

Также в работе определены упругие деформации и деформации сдвига, нормальные и касательные напряжения, возникающие в накате при различной его толщине и скорости движения устройства. Выявлена оптимальная скорость движения и толщина слоя наката, при которых, разрушающий эффект наиболее характерен.

Ключевые слова: ледяной накат; разрушающее устройство; численная модель; модель Эйлера-Лагранжа; деформации; касательные напряжения; дискретная модель

Введение

Для очистки от снега и наледи тротуаров, дорог и аэродромов используется снегоуборочная техника, с помощью которой сметают, сгребают и грузят снег на грузовые автомобили для вывоза его в места сбора (на свалки снега и снеготаялки с последующим сливом в канализационную сеть): плужная (боковой, передний, скоростной отвалы, задний скребок); щёточная, роторная (с плужно-, шнеко- и фрезернороторными рабочими органами), снегопогрузчики со скребковыми транспортёрами, а также газоструйные машины и распылители противогололёдных (технологических) материалов. Все эти машины осуществляют «борьбу» с ледяным накатом ликвидационным способом, то есть используются в условиях уже образовавшегося наката [1]. Общие недостатки всех вышеперечисленных видов машин: периодичность эксплуатации (необходимо обеспечивать условия хранения летом), принудительность вращения исполнительных механизмов, что неизбежно приводит к повреждению как дорожного покрытия, и сопутствующих инженерных конструкций (бордюров, рельсов и т. д.), и высокой стоимости (неизбежны дополнительные энергозатраты, связанные с работой вспомогательных механизмов).

В работе будет моделироваться реализация второго способа удаления ледяного наката с твёрдого дорожного покрытия устройством, которое способно эффективно работать в пассивном режиме, без лишних энергозатрат, легко в сборке и эксплуатации, а также не наносит асфальтовому покрытию повреждений, сохраняя целостность сопутствующих инженерных конструкций (бордюров, рельсов, канализационных люков). При этом важно отметить, что существуют различные решения по устройству для удаления с дорожных покрытий снежно ледяного наката, авторов В.М. Козина, В.Л. Земляка, Н.В. Протасова и др. [2; 3].

Моделирование разрушения ледяного наката — задача достаточно сложная и нетривиальная. Совместные конечно-элементные процедуры объединяют уравнения равновесия и уравнение непрерывности через действующие главные напряжения и объёмные деформации [4], Carter и др. [5] представили общую теорию упругих конечных деформаций, которая была позже обобщена до упругопластического упрочнения [6]. Prevost [7; 8] вывел обобщённую дополнительную форму упрочнения с учётом конечных деформаций и

нелинейности материала. Пористые среды, насыщенные и без насыщения, при динамических нагрузках, изучал, соответственно Zienkiewicz и Shiomi [9] и Meroi [10]. Во всех этих исследованиях, основные уравнения, выраженные в форме скорости, обычно используются для интегрирования напряжений по расчетным приращениям деформации.

На основе мультипликативного разложения градиентов деформации [11–13], Borja и Alarcon [14] представили математическую формулировку упругопластических деформаций, реализованных с использованием метода конечных элементов [15]. После тот же подход с использованием мультипликативного разложения градиентов деформации использовали Sanavia и др. [16], где были представлена постановка задачи по поиску больших деформации для насыщенных и частично насыщенных пористых сред. Этот тип постановки задачи обходит по возможностям применения, метод интегрирования напряжений по скорости и эффективен при расчете больших упругих напряжений. Для обработки обоих типов постановки: скорости и мультипликативного разложения, используется обновленный метод Лагранжа (UL), который принимается там, где координаты материальные точки обновляются в соответствии с перемещениями после каждого временного приращения. В случае относительно больших деформаций метод UL может привести к серьезным искажениям сетки, которые могут вызвать самопроизвольное прекращение расчёта.

С другой стороны, произвольный метод Лагранжа — Эйлера (ALE) был разработан для решения проблем расчета деформации с сильным искажением сетки в механике твердого тела и механике жидкости. Этот метод, однако, не привлек большого внимания в геомеханике — в основном из-за его сложности, особенно в связанных задачах, связанных как с деформацией, так и с течением в порах материала. Недавнее исследование Nazem [17] показали, что метод ALE, основанный на операторе split [18], может обеспечить эффективное решение проблемы искажения сетки, встречающейся в методе UL. В работе представлена формулировка ALE для задач уплотнения. Метод ALE основан на методе операторного расщепления, в котором Лагранжево решение конвектируется в эйлерову сетку.

Методы и материалы

Снежный и ледяной накат моделируется в программном комплексе ANSYS с применением модели Эйлера-Лагранжа. В методе UL уравнение равновесия имеет вид [11]:

$$\nabla^T \sigma_{ij}^{t+\Delta t} + b_i^{t+\Delta t} = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{i,j}$ — тензор напряжений (Коши); b_i — вектор силы тела и ∇ — градиентный оператор. Правый верхний индекс обозначает время, когда измеряются величины.

Основное предположение в уравнении (1) состоит в том, что все переменные и параметры состояния известны во время t . Цель расчета состоит в том, чтобы найти неизвестные в момент времени $t + \Delta t$. Главные рабочие напряжения находятся как отношение общих напряжений Коши к эффективным напряжениям Коши $\sigma'_{i,j}$, через поровое давление — p :

$$d\sigma_{ij} = d\sigma'_{ij} + dp \cdot \delta_{ij}, \quad (2)$$

где $\delta_{i,j}$ — дельта Кронекера.

При анализе больших деформаций влияние угла поворота абсолютно твердого тела необходимо учитывать в связи напряжение-деформация. Часто принимаются во внимание напряжения в независимой модели. В работе используется степень изменения напряжений Jaumann, которая определяется как:

$$d\tilde{\sigma}'_{ij} = d\sigma'_{ij} - \sigma'_{ik} d\Omega_{kj} - \sigma'_{jk} d\Omega_{ki} = C'_{ijkl} \cdot d\varepsilon_{kl}, \quad (3)$$

где Ω — тензор вращения; C' — образующая матрица материала; ε_{ij} — тензор линейных деформаций. При этом, в уравнении (3) изменения напряжений Jaumann, применяется только к эффективным напряжениям, так как давление не зависит от модели, и его уникальный компонент не изменяется при жестком вращение тела. Вводя уравнения (2) и (3) в уравнение равновесия и применяя стандартную процедуру метода конечных элементов, можно получить коэффициенты уравнения следующего матричного равенства:

$$\dot{F}^{int} = K^{ep} \dot{U} + L \dot{P} = \dot{F}^{ext}, \quad (4)$$

где K^{ep} и L соответственно матрица жёсткости и связующая матрица; F^{ext} — вектор внешних сил; F^{int} — вектор внутренних сил.

Обозначив v_s как скорость частицы грунта и \tilde{v} как отношение скорости наката на поверхности, мы можем записать закон сохранения массы как:

$$\frac{\partial v_{si}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (5)$$

При выводе уравнения (5) предполагается, что твердые вещества грунта и накат намного меньше сжимаемы, чем скелет грунта. По закону Дарси:

$$\tilde{v}_i = n(v_{wi} - v_{si}) = -\frac{k_{ij}}{\gamma_w} \left(\frac{\partial p}{\partial x_j} - b_{wj} \right), \quad (6)$$

где n — пористость грунта; v_w — скорость потока; k — тензор проницаемости, $b_w = \{0, \gamma_w, 0\}^T$ и γ_w — удельный вес. Сочетание закона линейной фильтрации Дарси с сохранением массы и следующая стандартная линеаризация конечных элементов, может быть получено следующее уравнение:

$$L^T \dot{U} + \dot{H} P = \dot{Q}^{ext}, \quad (7)$$

где H — матрица потока, а Q — вектор расхода.

Уравнения (4) и (7) образуют систему уравнений в виде:

$$\begin{bmatrix} K^{ep} & L \\ L^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \dot{H} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{F}^{ext} \\ \dot{Q}^{ext} \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Уравнение (8) обычно указывается в компактной форме следующим образом:

$$C \dot{X} + K X = \dot{W}^{ext},$$

где

$$C = \begin{bmatrix} K^{ep} & L \\ L^T & 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \dot{H} \end{bmatrix}, X = \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix}, \dot{X} = \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix}, \dot{W}^{ext} = \begin{Bmatrix} \dot{F}^{ext} \\ \dot{Q}^{ext} \end{Bmatrix}.$$

В литературе существуют различные схемы изменения времени для решения уравнения (9), например, Booker и Small [19] или Sloan и Abbo [20]. В работе используется θ — метод. Выбирая $\theta = 1$, приходим к классической обратной схеме Эйлера, показанной как:

$$C \{X_{n+1} - X_n\} + h K X_{n+1} = h \dot{W}_{n+1}^{ext}, \quad (10)$$

В случае констант C и K , например, для анализа малых деформаций грунта с водопроницаемостью в форме константы, система уравнений, определенная (10), может быть решена для X_{n+1} . В общем же случае C и K зависят от X и находятся как X_{n+1} в обратном методе Эйлера. Уравнение (10) должно быть решено итерационным методом. Для этого принят стандартный метод Ньютона-Раффсона. Больше информации об уравнении (9) представлено в работе Sheng и Sloan [21].

Для нелинейных материалов, таких как те, которые представлены моделями Мора-Колумба или Кэм-Клея, приращение напряжения обычно определяется путем интегрирования по заданному приращению деформаций. Для достаточно маленьких деформаций интегрирование напряжений осуществляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{t+\Delta t} &= \sigma_{ij}^t + \int_0^{\Delta \varepsilon_{kl}} C'_{ijkl}(\sigma', \kappa) d\varepsilon_{kl} \\ \kappa_i^{t+\Delta t} &= \kappa_i^t + \int_0^{\Delta \varepsilon_{kl}} B_i(\sigma', \kappa) d\lambda = \kappa_i^t + \int_0^{\Delta \varepsilon_{kl}} B_i(\sigma', \kappa) \cdot D_{kl}(\sigma', \kappa) d\varepsilon_{kl}, \end{aligned} \quad (11)$$

где k_i — набор уточняющих параметров; C' — составная матрица в зависимости от направления напряжений и параметров упрочнения; B — набор переменных, полученных из закона упрочнения и является как правило, функцией текущих напряжений и параметров упрочнения; $d\lambda$ — коэффициент пластичности, зависящий от скорости деформаций; D — вектор, полученный из условия совместности и правила потока, и также является функцией текущих напряжений и параметров упрочнения.

При анализе больших деформаций интегрирование напряжений больше не регулируется уравнением (11) из-за возможного вращения твердого тела. В формулировке UL, основанной на скорости напряжения Яуманна, эффект прироста напряжений определяется путем интегрирования $d\sigma'$ — в уравнение (3) для определения заданного приращения деформации, т. е.:

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \sigma_{ij}^t + \int_0^{\Delta \varepsilon_{ij}} d\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^t + \int_0^{\Delta \varepsilon_{kl}} C'_{ijkl}(\sigma') d\varepsilon_{kl} + \int_0^{\Delta \Omega_{kl}} (\sigma'_{ik} d\Omega_{jk} + \sigma'_{jl} d\Omega_{il}), \quad (12)$$

где $C'(\sigma')$ — относится к определяющей матрице по отношению к системе в момент времени t и является функцией текущих напряжений Коши.

Уравнение (12) показывает, что выражения интегрирования напряжений, используемые для небольших деформаций, должны быть изменены, чтобы включить дополнительные составляющие из-за вращения абсолютно-твёрдого тела. Рассматривая пересечение $\Delta \Omega_{ij}$, возможно, показать, что второе интегрирование в выражении (12) эквивалентно преобразованию напряжений:

$$\sigma_{ij}^t + \int_0^{\Delta \Omega_{kl}} (\sigma'_{ik} d\Omega_{kj} + \sigma'_{jl} d\Omega_{li}) = Q_{ik} \sigma_{kl}^t Q_{jl}, \quad (1)$$

где

$$Q_{ij} = (\delta_{ik} - \alpha \Delta \Omega_{ik})^{-1} (\delta_{kj} + (1 - \alpha) \Delta \Omega_{kj}),$$

где α — параметр интегрирования, колеблющийся между 0 и 1.

Одним из ключевых требований для интегрирования напряжений для системы с большими деформациями является то, что она должна быть объективной, то есть преобразование напряжений (13) не должно вызывать деформирования.

Результаты и их обсуждение

Механические характеристики ледяного наката: плотность 500 кг/м^3 , модуль Юнга $E = 7,1 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $0,33$, объёмный модуль упругости $K = 6,9 \cdot 10^9 \text{ Па}$, модуль сдвига $G = 2,66 \cdot 10^9 \text{ Па}$, максимальные пластические деформации $0,5$, прочность на сжатие $R = 1,8 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

Механические характеристики стальных дисков: плотность материала $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $0,3$, объёмный модуль упругости $K = 1,66 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, модуль сдвига $G = 7,69 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

На рисунке 1 представлена дискретная модель задачи. Снежный накат был смоделирован гексаэдрами с максимальной длиной стороны $0,1 \text{ м}$, разрушающее устройство представляло собой диски на цилиндрической основе, разделённые на конечные элементы в форме тетраэдра.

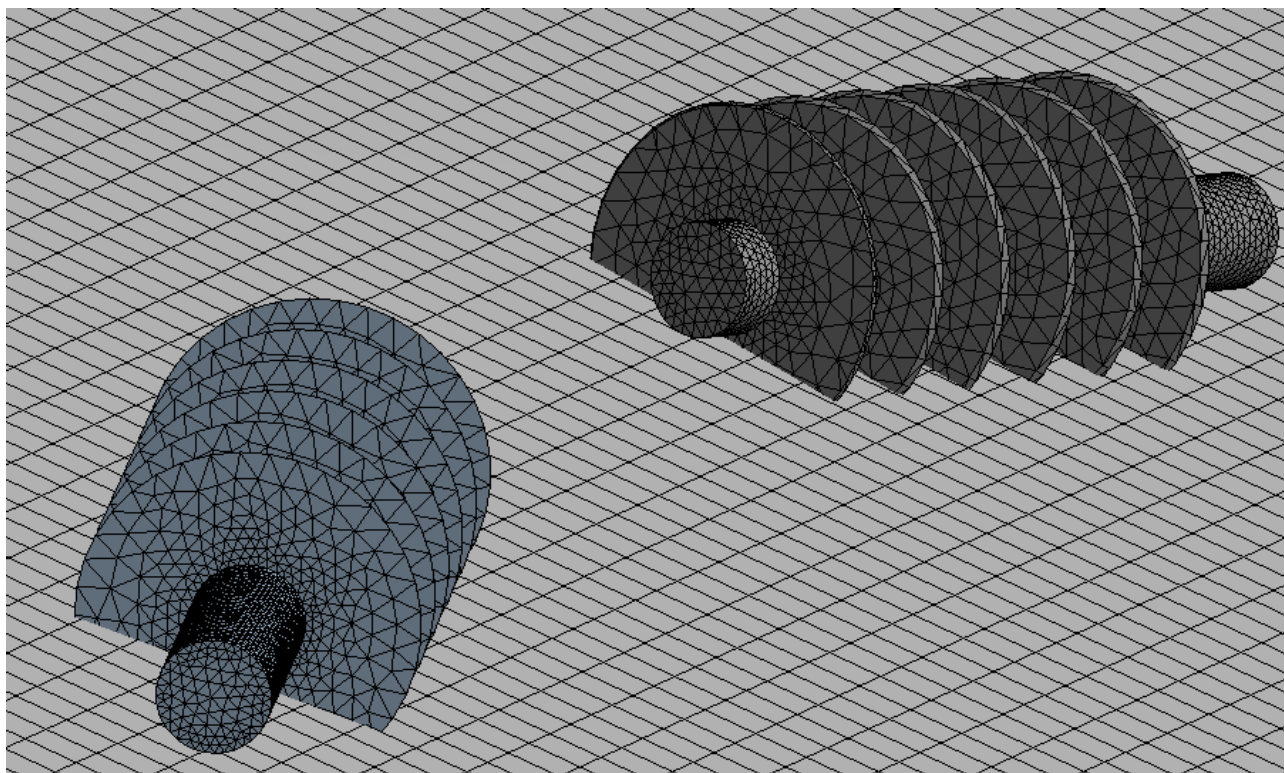
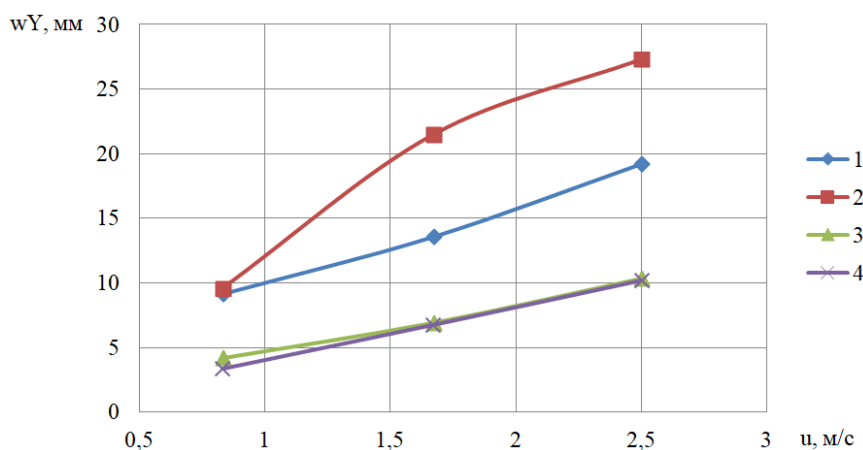


Рисунок 1. Дискретная модель (разработано автором)

В ходе численных экспериментов толщина наката принималась равной $h = 25\text{--}100 \text{ мм}$, с шагом 25 мм . Скорость движения устройства при условии внедрения дисковых элементов до твердого дорожного покрытия составила $u = 0,83\text{--}2,5 \text{ м/с}$.

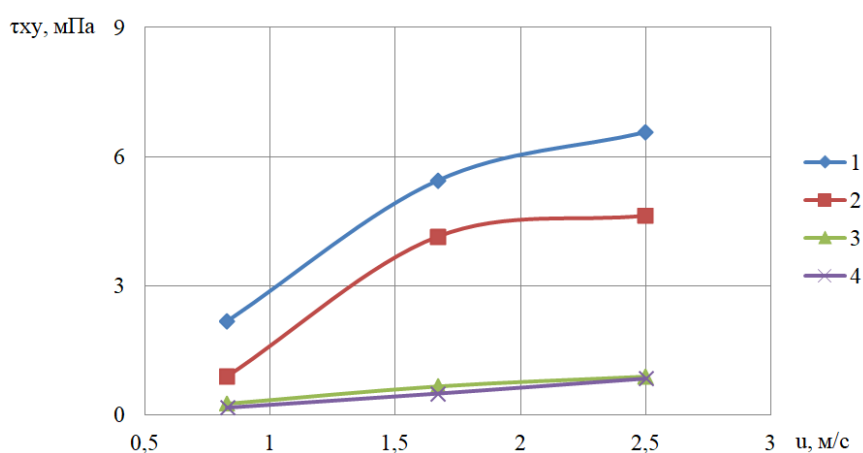
Расчеты выполнялись с целью определения наиболее эффективных режимов работы устройства в зависимости от толщины наката. Основные результаты численных расчетов по определению напряженно-деформированного состояния наката приведены на рисунках 2–4.

На рисунке 2 показаны зависимости деформаций сдвига w_Y от скорости движения устройства для различной толщины ледяного наката. Из графиков видно, что максимальные смещения были характерны для наката толщиной $h = 50 \text{ мм}$. Деформации сдвига для наката $h = 25 \text{ мм}$ снижались до 30% . Минимальные значения w_Y принимали при толщине слоя $75\text{--}100 \text{ мм}$, значительно уступая значениям при $h = 25\text{--}50 \text{ мм}$.



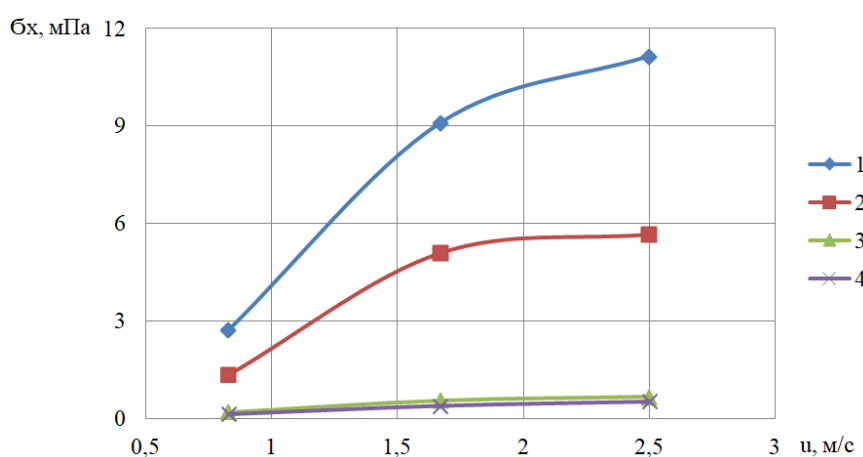
1 — $h = 25$ мм; 2 — $h = 50$ мм; 3 — $h = 75$ мм; 4 — $h = 100$ мм

Рисунок 2. Зависимости деформаций сдвига wY от скорости движения устройства для различной толщины ледяного наката (разработано автором)



1 — $h = 25$ мм; 2 — $h = 50$ мм; 3 — $h = 75$ мм; 4 — $h = 100$ мм

Рисунок 3. Зависимости касательных напряжений τ_{xy} от скорости движения устройства для различной толщины ледяного наката (разработано автором)



1 — $h = 25$ мм; 2 — $h = 50$ мм; 3 — $h = 75$ мм; 4 — $h = 100$ мм

Рисунок 4. Зависимости нормальных напряжений B_x от скорости движения устройства для различной толщины ледяного наката (разработано автором)

Максимальные касательные напряжения τ_{xy} (рис. 3) и нормальные напряжения σ_x наблюдались для наката $h = 25$ мм (рис. 4). Минимальные значения были характерны также для случаев $h = 75-100$ мм.

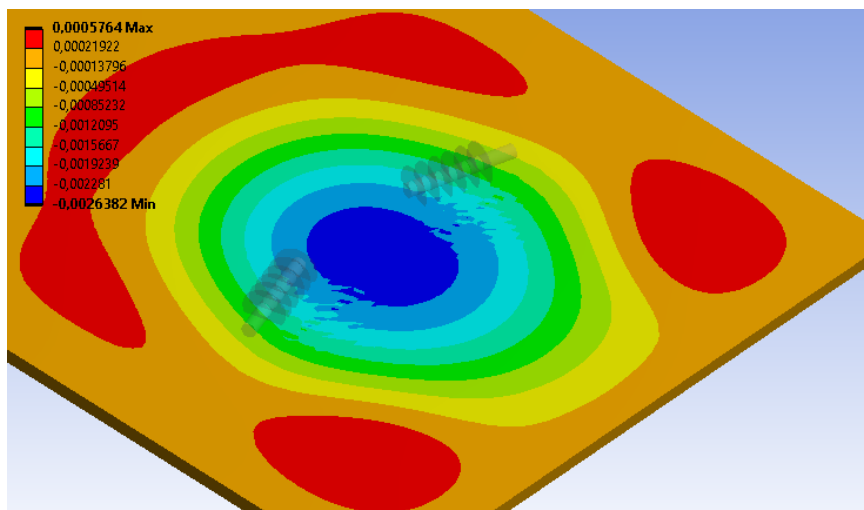


Рисунок 5. Изополе упругих деформаций при движении устройства со скоростью 1,67 м/с при $h = 25$ мм (разработано автором)

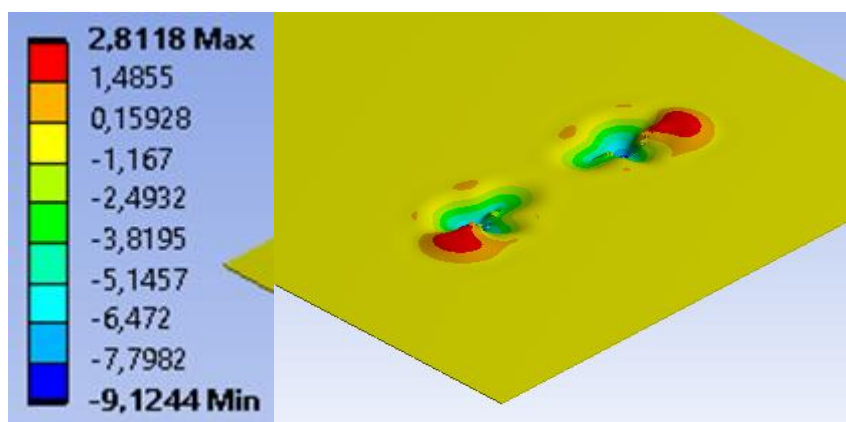


Рисунок 6. Изополе сдвиговых деформаций при движении устройства со скоростью 1,67 м/с при $h = 25$ мм (разработано автором)

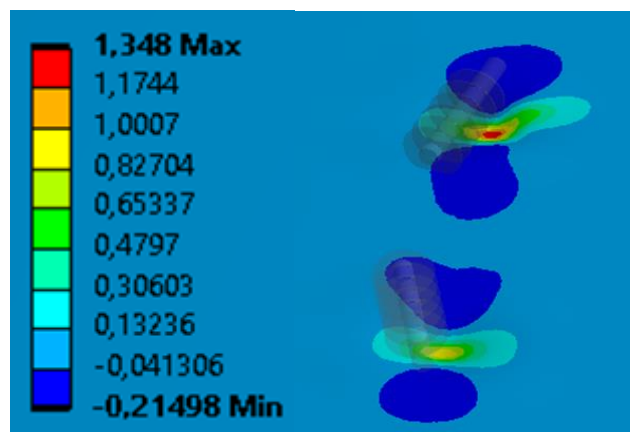


Рисунок 7. Изополе нормальных напряжений σ_x при движении устройства со скоростью 1,67 м/с при $h = 25$ мм (разработано автором)

На рисунках 5–7 показаны примеры изополей упругих, сдвиговых деформаций и нормальных напряжений. Анализ напряженно-деформированного состояния наката показывает, что наибольшие перемещения частиц наката происходят по контуру (периметру) дисков и на поверхности покрытия. Наибольшие эквивалентные напряжения наблюдаются по контуру дисков (периметру). Средняя часть диска (приближаясь к центру) практически не участвует в работе устройства. Наибольшее перемещение частиц наката происходит по контуру диска, по краям же они почти нулевые. Наиболее важна картина распределения напряжений, где происходит оценка их наибольших значений. На основании анализа решений расчётного моделирования можно сделать вывод, что максимальная интенсивность скола наката происходит под углом 45° .

По результатам численного эксперимента можно сделать основные выводы:

- Наилучший эффект наблюдался для наката толщиной равной $h = 25\text{--}50$ мм, разрушение наката толщиной более 50 мм с заданными физико-механическими свойствами предлагаемым устройством является крайне неэффективным.
- Для наката толщиной равной $h = 25\text{--}50$ мм наблюдались как максимальные значения сдвиговых деформаций, так и значения касательных и нормальных напряжений, отвечающих за разрушение слоя наката и его отделения от поверхности твердого дорожного покрытия.
- Оптимальная скорость движения составляет 1,67 м/с, при малой скорости движения равной 0,5 м/с значения исследуемых значений были значительно ниже. Увеличение скорости движения не приводило к значительному росту значений деформаций и напряжений.

Дальнейшие направления исследований:

- Необходимо провести расчеты для наката с различными физико-механическими свойствами, а также с различной твердостью поверхности, т. к. в реальных условиях снежный накат, часто покрывается ледяной коркой при температурных перепадах.
- Определить оптимальные углы атаки для секций с дисковыми ножами и углы заточки ножей, для численного эксперимента он составил 45° .
- На данный момент численная модель является не разрушаемой и не позволяет увидеть картины разрушения ледяного наката.

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- Разработанный алгоритм на основе численной модели, реализованной в программном комплексе ANSYS для определения напряженно-деформированного состояния ледяного наката от внедрения в него дисковых ножей.
- Определены упругие деформации и деформации сдвига, нормальные и касательные напряжения, возникающие в накате при различной его толщине и скорости движения устройства. Для наката толщиной равной $h = 25\text{--}50$ мм наблюдались как максимальные значения сдвиговых деформаций, так и значения касательных и нормальных напряжений, отвечающих за разрушение слоя наката и его отделения от поверхности твердого дорожного покрытия.

- Выявлена оптимальная скорость движения и толщина слоя наката, при которых, разрушающий эффект наиболее характерен. Наилучший эффект наблюдался для наката толщиной равной $h = 25\text{--}50$ мм, разрушение наката толщиной более 50 мм с заданными физико-механическими свойствами предлагаемым устройством является крайне неэффективным. Оптимальная скорость движения составила 1,67 м/с, при малой скорости движения равной 0,5 м/с значения исследуемых значений были значительно ниже. Увеличение скорости движения не приводило к значительному росту значений деформаций и напряжений.
- Анализ напряженно-деформированного состояния наката показывает, что наибольшие перемещения частиц наката происходят по контуру (периметру) дисков и на поверхности покрытия. Средняя часть диска (приближаясь к центру) практически не участвует в работе устройства. Максимальная интенсивность скола наката происходит под углом 45° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Куляшов А.П., Молев Ю.И., Шапкин В.А. Зимнее содержание дорог / Н. Новгород: НГТУ, 2007. 318 с.
2. Козин В.М., Земляк В.Л., Протасов Н.В. Устройство для удаления с поверхности аэродромных и твердых дорожных покрытий ледяного и снежного накатов, Вестник Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема. 2018. № 4(33). С. 98–106.
3. Козин В.М., Литовченко А.К., Макеева В.С. Совершенствование технологии удаления ледяного и снежного наката с поверхности дорожного покрытия // Строительные и дорожные машины. 2011. № 1. С. 25–31.
4. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics 1941; 12: 155–169.
5. Carter J.P., Small J.C., Booker J.R. A theory of finite elastic consolidation. International Journal of Solids and Structures 1977; 13: 467–478.
6. Carter J.P., Booker J.R., Small J.C. The analysis of finite elasto-plastic consolidation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 1979; 3: 107–129.
7. Prevost J.H. Mechanics of continuous porous media. International Journal of Engineering Science 1980; 18: 787–800.
8. Prevost J.H. Nonlinear transient phenomena in saturated porous media. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1982; 20: 3–18.
9. Zienkiewicz O.C., Shiomi T. Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 1984; 8: 71–96.
10. Meroi E.A., Schrefler B.A., Zienkiewicz O.C. Large strain static and dynamic semisaturated soil behaviour. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 1995; 19: 81–106.

11. Simo J.C., Ortiz M. A unified approach to finite deformation elastoplastic analysis based on the use of hyperelastic constitutive laws. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1985; 49: 221–245.
12. Simo J.C. A framework for finite strain elastoplasticity based on maximum plastic dissipation and the multiplicative decomposition: part I. Continuum formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1988; 66: 199–219.
13. Simo J.C. A framework for finite strain elastoplasticity based on maximum plastic dissipation and the multiplicative decomposition: part II. Computational aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1988; 68: 1–31.
14. Borja R.I., Alarcon E. A mathematical framework for finite strain elastoplastic consolidation. Part 1: balance laws, variational formulation, and linearization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1995; 122: 145–171.
15. Borja R.I., Tamagnini C., Alarcon E. Elastoplastic consolidation at finite strains. Part 2: finite element implementation and numerical examples. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1998; 159: 103–122.
16. Sanavia L., Schrefler B.A., Steinmann P. A formulation for unsaturated porous medium undergoing large inelastic strains. *Computational Mechanics* 2002; 28(2): 137–151.
17. Nazem M., Sheng D., Carter J.P. Stress integration and mesh refinement in numerical solutions to large deformations in geomechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2006; 65: 1002–1027.
18. Benson D.J. An efficient, accurate and simple ALE method for nonlinear finite element programs. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1989; 72: 305–350.
19. Booker J.R., Small J.C. An investigation of the stability of numerical solutions of Biot's equations of consolidation. *International Journal of Solids and Structures* 1975; 11: 907–917.
20. Sloan S.W., Abbo A.J. Biot consolidation analysis with automatic time stepping and error control. Part 1: theory and implementation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 1999; 23: 467–492.
21. Sheng D., Sloan S.W. Time stepping schemes for coupled displacement and pore pressure analysis. *Computational Mechanics* 2003; 31: 122–134.

Vasilyev Alexey Sergeevich

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia
E-mail: vasil-grunt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7783-0000>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=896244

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57203895897>

Zemlyak Vitaliy Leonidovich

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia
E-mail: vellkom@list.ru

Protasov Nikolay Valer'yevich

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia
E-mail: vellkom@list.ru

Babashov Daniel' El'manovich

Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia
E-mail: daniel.babashov2020@mail.ru

Numerical modeling of the stress-strain state of snow and ice run-up during its destruction under the influence of the proposed device

Abstract. In the winter season, there is an increase in injuries and traffic accidents due to the occurrence of ice and ice run on paved roads. Cleaning road surfaces from rolling includes two technological operations: its destruction and transportation of the formed fragments. The main process that determines the cleaning performance is the cutting process, i.e. separation of fragments of rolling from the road surface with a cutting tool of special machines. The aim of the work is to simulate the process of destruction of ice run under the influence of the device developed by the authors. Modeling the destruction of ice run-up is a rather complex and non-trivial task.

The updated Lagrange model implemented in a modern software package is used. As a result, an algorithm was developed based on a numerical model implemented in the ANSYS software package to determine the stress-strain state of ice run-up from the introduction of disk knives into it. An analysis of the stress-strain state of the run-up shows that the largest movements of the run-up particles occur along the contour (perimeter) of the disks and on the surface of the coating. The highest equivalent stresses are observed along the contour of the disks (perimeter). The middle part of the disk (approaching the center) practically does not participate in the operation of the device. The largest movement of run-up particles occurs along the contour of the disk, while at the edges they are almost zero.

Also in the work, elastic and shear deformations, normal and tangential stresses arising in the run-up at its different thickness and speed of the device are determined. The optimal speed of movement and the thickness of the rolling layer are revealed, at which the destructive effect is most characteristic.

Keywords: ice run; destructive device; numerical model; Euler-Lagrange model; deformations; shear stresses; discrete model