

of solid particles in a device with contact devices. This is due to the fact that the proposed analytical regularities do not take into account the influence of the main design parameters of the cascade contacts on the time the particles stay in the working space of the device. The efficiency of drying devices for drying materials in a fluidized bed largely depends on the flow field of the gas flow, the distribution of which in the working space of the device affects the profile of temperatures and concentrations of the dispersed (solid) phase in the gas flow.

Determination of gas flow velocity fields in the working space of the fluidized bed apparatus in combination with calculations of the rate of transition of a dense layer of material into a fluidized state, conditions of expansion of the material layer, operating parameters of fluidization, and conditions of removal of material from the apparatus allows for optimal selection of the design characteristics of this type of apparatus. Consideration of the nature of the movement of the gas flow is important for establishing the regularities of its interaction with the solid phase. Determining the hydrodynamic conditions of flow movement makes it possible to mathematically describe the speed and residence time of solid particles in the apparatus.

**cascade dryer, fluidized bed, solid phase, material drying, moisture reservoir, drying time, fluidization, contact time**

*Одержано (Received) 22.11.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.12.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 29.12.2022*

**УДК 691.615.1**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.120-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.120-126)

**Г.Д. Портнов**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук,

**В.В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: budkom999@gmail.com*

## Модель стенда для дослідження конструкцій з ЛИСТОВОГО СКЛА

В даній роботі представлена розроблена в середовищі SOLIDWORKS модель стенда для дослідження конструкцій з листового скла під дією рівномірно розподіленого тиску. Дослідження моделі в модулі SOLIDWORKS Simulation за запропонованими налаштуваннями дозволяє дослідити напружений стан листового скла в залежності від параметрів гумової прокладки і обґрунтувати конструкцію супорта. Модель дозволяє оцінити напружено – деформований стан елементів конструкції на основі критерія руйнування Мора – Кулона (для скляної пластини), напружень (за Мизесом та інших) для елементів супорта. Приведені налаштування програми забезпечують її безконфліктну роботу з невеликими витратами машинного ресурсу. Є можливість варіацій конструкції супорта, включаючи врахування умов закріплення (тертя) елементів. Локалізація критичних напружень в скляній пластині співпадає з даними натурних експериментів, що говорить об адекватності моделі. Розроблена модель стенду дозволяє дослідити напружений стан листового скла в умовах рівномірного навантаження в залежності від параметрів гумової прокладки і обґрунтувати конструкцію супорта.

**листова скла, супорт, 3D моделювання, критерії руйнування, напруження Мора – Кулона**

**Постановка проблеми.** Сучасні архітектурні рішення передбачають застосування листового скла як конструктивного матеріалу, здатного сприймати значні навантаження. При розрахунках на міцність існуючі нормативні документи, такі як ГОСТ Р 56926-2016 та EN 12150-2, передбачають, переважно, вітрові навантаження на поверхню скляної пластини.

© Г.Д. Портнов, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов, 2022

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Введення норм розрахунку конструкцій зі скла ускладнюється варіативністю його характеристик міцності [1]. На відміну від традиційних конструктивних матеріалів граничний стан листа скла залежить не тільки від внутрішніх дефектів, але і від технологічних факторів, залишкових напружень, стану поверхні та кромки [2]. Це робить результати випробувань виробника статично неоднорідними. До того ж на надійність конструкції впливають конструктивні фактори закріплення листа (фальцева зона, трьох- та чотирих-точковий згин, кільце-на-кільце) [3, 4], умови експлуатації (циклічне та тривале статичне, динамічне навантаження) [5, 6].

На практиці питання конструктивного забезпечення надійності вирішуються на місцях проведення натурних випробувань значної кількості варіантів будівельних конструкцій [7, 8].

Застосування листового скла як конструктивного матеріалу, здатного сприймати значні навантаження ускладнюється відсутністю системи нормативних документів з розрахунків напружено – деформованого стану конструктивних елементів.

Класична теорія руйнування для крихких матеріалів з різними властивостями розтягування та стиснення передбачає обрання критерієм руйнування напруження Мора – Кулона [9]. Обчислення цього показника в умовах натурального експерименту є проблематичним.

У Німеччині в TRLV (Технічні умови для застосування лінійно встановленого скління) розрахунок конструктивних елементів зі скла здійснюється шляхом порівняння діючого напруження при розтяганні з допустимим напруженням.

В ГОСТ Р 56926—2016 як основний критерій розрахунку зовнішнього балконного скління приймають розрахункове значення гранично допустимого прогину скла.

Аналітичні розрахунки з використанням узагальнених коефіцієнтів надійності на практиці призводять до економічно невиправданих рішень при розробці несучих конструкцій.

**Постановка завдання.** Метою статті є застосування можливостей сучасних програмних комплексів 3D моделювання з інтегрованими модулями розрахунку напружено-деформованого стану моделі дозволяє істотно знизити собівартість цих випробувань при використанні віртуального стенда.

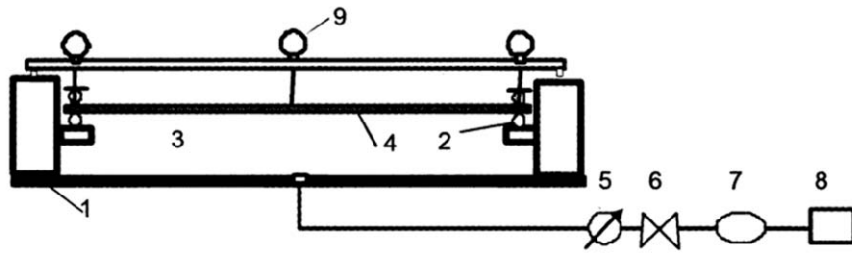
**Виклад основного матеріалу.** Особливості віртуального стенда для дослідження конструкцій з листового скла пов'язані з нелінійним характером деформацій при навантаженні, невизначеністю критеріїв руйнування, а також з обранням умов контакту деталей стенда.

З прагненнями спростити застосування напівемпіричних формул пов'язані введення в розрахунки в якості критеріїв руйнування головних напружень та комбінацій напружень розтягу, стискання, а також дотичних напружень, які можуть бути обчислені за допомогою датчиків.

Щодо взаємодії між деталями, то спроби врахувати занадто велику кількість факторів призводить до невиправдано великих витрат машинного ресурсу [10, 11,].

Запропонована модель стенда дозволяє оцінити напружено – деформований стан встановленого в раму прямокутного листа скла при дії на його поверхню рівномірно розподіленого тиску.

Прототипом моделі є стенд для натурних досліджень листового скла на згин [8], показаний на рис. 1.

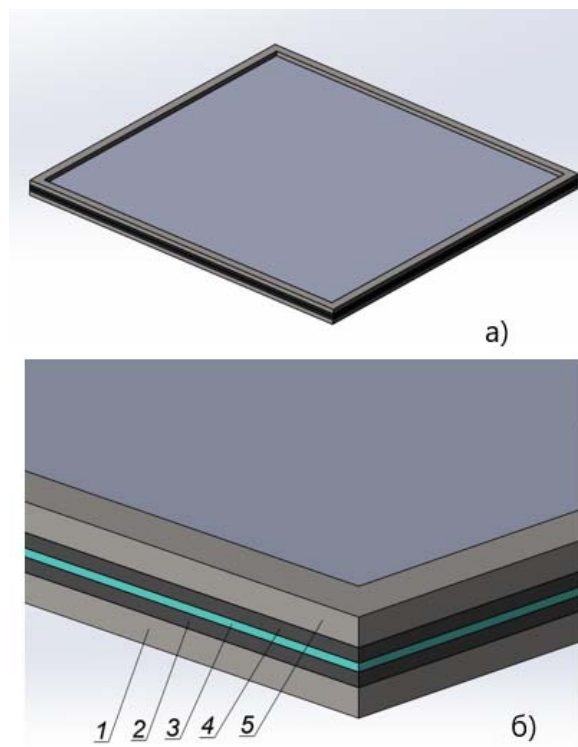


1 – герметична камера; 2 – гумові прокладки по периметру; 3 – вакуумна камера; 4 – зразок листового скла; 5 – манометр; 6 – запірний кран; 7 – ресивер; 8 – вакуумний насос; 9 – індикатори.

Рисунок 1 – Конструкція стенда для випробування листового скла рівномірно розподіленим навантаженням

Джерело [8]

Розроблена в середовищі SOLIDWORKS модель показана на рис.2



а) – загальний вигляд; б) – деталізація

1 – нижня рама; 2, 4 – гумова прокладка; 3 – лист скла; 5 – верхня рама.

Рисунок 2 – Модель стенда для випробування листового скла рівномірно розподіленим навантаженням  
Джерело: розроблено авторами

Модель включає нижню та верхню прямокутні рами, дві гумові прокладки, в плані подібні до рами і прямокутний скляний лист за зовнішніми габаритами в плані подібний до рами.

Товщина і матеріал рами обирається довільно, бо при розрахунку моделі рама призначається абсолютно твердим тілом.

Розміри скла, гумової прокладки і їх фізико-технічні властивості призначаються в залежності від умов експерименту.

Дослідження моделі виконуються в модулі SOLIDWORKS Simulation за наступними налаштуваннями:

1. Тип дослідження: нелінійне статичне.  
Часовий інкремент: «автоматично».  
Параметри нелінійності: «використовувати склад для великого зсунення»; «параметр великої деформації» включений.  
Обрання програми, що вирішує: «автоматично».
2. Деталі: рама – жорстке тіло; скляна пластина і гумова прокладка – такі, що деформуються.
3. Взаємодія компонентів: «нижня рама (нижня, верхня) - гумова прокладка (нижня, верхня)» - «пов'язані з незалежною сіткою»; «скляна пластина – гумова прокладка (нижня, верхня)» - локальна взаємодія « контакт з тертям».
4. Кріплення: «зафіксована геометрія» рам (рис.3)

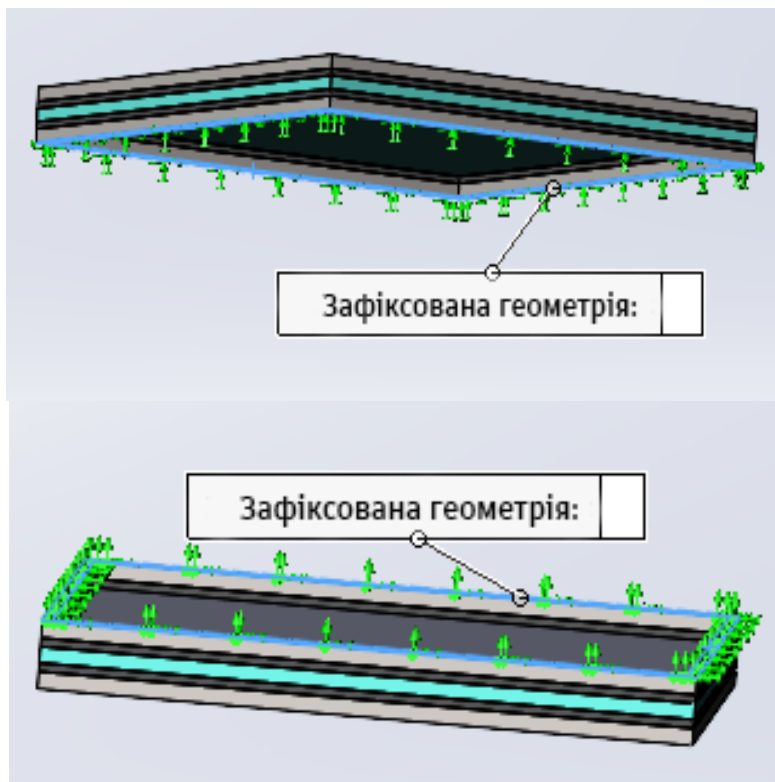


Рисунок 3 – Кріплення рам

Джерело: розроблено авторами

5. Зовнішнє навантаження: тиск на верхню поверхню скла за межами гумової прокладки (рис.4).

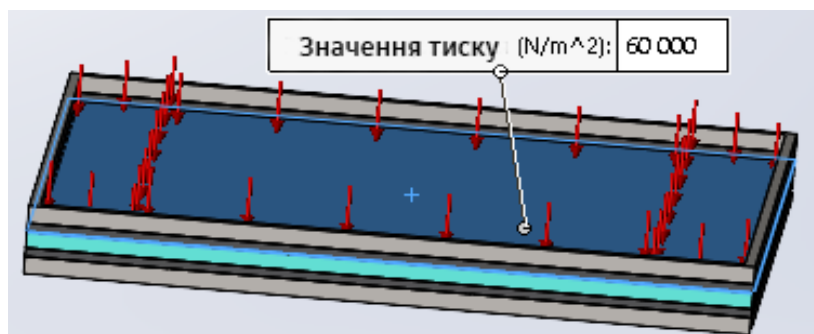


Рисунок 4 – Зовнішнє навантаження на скляну пластину

Джерело: розроблено авторами

6. Сітка: на основі змішаної кривизни.

Дослідження моделі дозволяє:

- безпосередньо визначити значення і локалізацію головних напружень скляної пластини (рис.5);

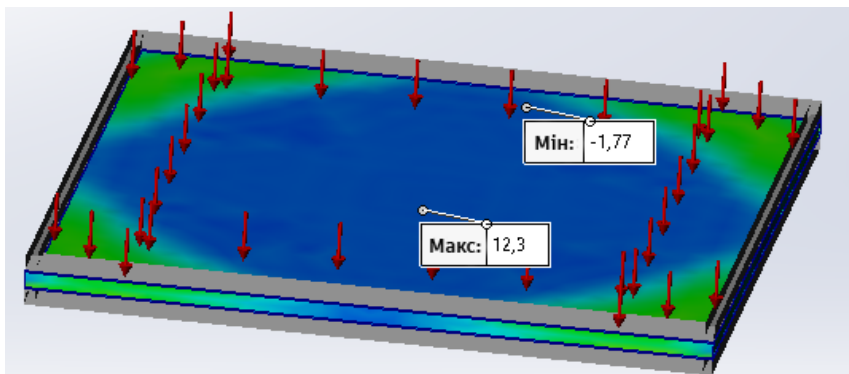


Рисунок 5 – До визначення головних напружень

*Джерело: розроблено авторами*

- безпосередньо визначити значення і локалізацію мінімального коефіцієнту запасу міцності за критерієм руйнування Мора – Кулона (рис.6) з наступним перерахунком напруження Мора – Кулона в залежності від закладеного в матеріал скла значення межі міцності;

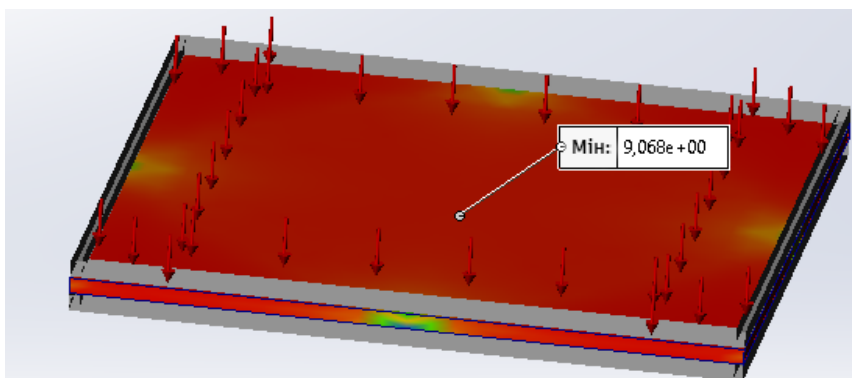


Рисунок 6 – До визначення коефіцієнту запасу міцності за критерієм руйнування Мора – Кулона

*Джерело: розроблено авторами*

- безпосередньо визначити значення і локалізацію максимального зміщення точки моделі (рис.7) з можливістю вирахування переміщення вузла пластини;

- визначити деформації.

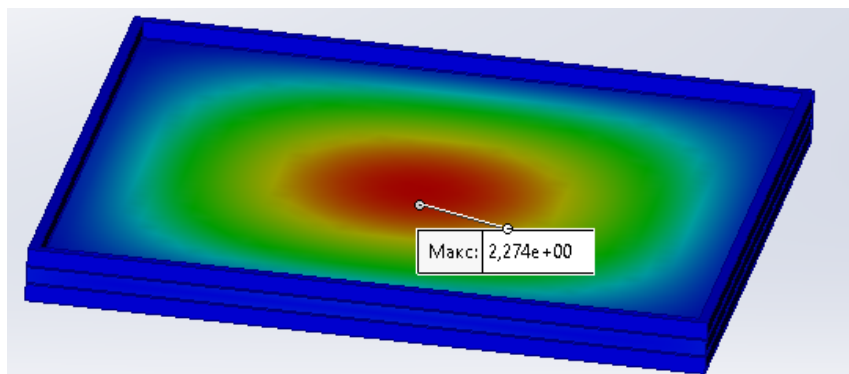


Рисунок 7 – До визначення переміщення

*Джерело: розроблено авторами*

**Висновки:**

1. Приведені налаштування забезпечують безконфліктну роботу програми.
2. Локалізація критичних напружень в скляній пластині співпадає з даними натурних експериментів, що говорить про адекватність моделі.
3. Розроблена модель стелю дозволяє дослідити напружений стан листового скла в умовах рівномірного навантаження залежно від параметрів гумової прокладки і обґрунтувати конструкцію супорта.

**Список літератури**

1. Демчина Б., Сумрай М., Ткач Р., Гула В. Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла. *Будівельні конструкції. Теорія і практика: збірник наукових праць МОН України*. Київський національний університет будівництва і архітектури. 2020. Вип. 6. С. 94–113.
2. Родічев Ю. М., Веєр Ф. А., Сорока О. Б., Шабетя О. А. Конструкційна міцність термічно зміцненого скла. *Проблеми прочності*. 2018. № 4. С. 85–100.
3. Mognato E., Brocca S., and Comiati F. Which is the right reference surface compression value for heat treated glass. *Challenging Glass 6*. C. Louter, F. Bos, J. Belis, et al. (Eds.). 2018. P. 703–712. <https://doi.org/10.7480/cgc.6>.
4. Veer F. A. and Rodichev Y. M. The relation between pre-stress and failure stress in tempered glass. *Challenging Glass 4 and COST Action TU0905 Final Conference*. C. Louter, F. Bos, J. Belis, J.-P. Lebet (Eds.). Leiden: CRC Press. 2014. P. 731–738.
5. Kalamar R., Eliášová M. Load Bearing Innovative Construction from Glass. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 96*. 2015. P. 12–66. <https://doi.org/10.1088/1757-99X/96/1/012066> (Lest accessed: 04.11.2022)
6. Mould R. E. The Strength of Inorganic Glasses. L.J. Bonis, J. J. Duga, J.J. Gilman (Eds), *Phenomena in the Materials Sciences, V. 4: Fracture of Metals Polymers and Glasses*, Plenum Press. 1967. P. 119-149. [http://www.americanglassresearch.com/sites/default/files/r009the\\_strength\\_of\\_inorganic\\_glass.pdf](http://www.americanglassresearch.com/sites/default/files/r009the_strength_of_inorganic_glass.pdf). (Lest accessed: 07.11.2022)
7. Costa S., Miranda M., Varum H., Teixeira-Dias, On the Evaluation of the Mechanical Behaviour of Structural Glass Elements. *Materials Science Forum 514-516*. 2006. P. 799-803. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.799>.
8. Nielsen J. H. Experimental investigation of residual stresses in toughened glass. *Challenging Glass 1*. F. Bos, C. Louter, and F. Veer (Eds.). Amsterdam: Delft University Press. 2008. P. 387–398.
9. Родичев Ю. М. Дефекты поверхности и прочность листового стекла при циклическом и длительном статическом нагружении. *Проблеми прочності*. 2015. № 2. С. 101–115.
10. Zubkov V., Kondratieva N. Flat glass strength in facade systems coverings and floorings of buildings and structures. *Glass. Facade. Energy. Dusseldorf (Germany)*. 2010. P. 63–70.
11. Veer F. A. and Rodichev Y. M. Improving the engineering strength of heat strengthened glass. *Heron*. 2016. 61, No. 2. P. 121–138.

**References**

1. Demchyna, B., Sumrai, M., Tkach, R. & Gula, V. (2020). Determining the physical and mechanical properties of glass for bending using the two-parameter Weibull distribution. *Building structures. Theory and practice: a collection of scientific works of the Ministry of Education and Science of Ukraine*. Kyiv National University of Construction and Architecture. Issue 6. P. 94–113 [in Ukrainian].
2. Rodichev, Yu.M., Veyer, F.A., Soroka, O.B. & Shabetya, O.A. (2018). Structural strength of thermally strengthened glass. *Strength problems*. No. 4. P. 85–100 [in Ukrainian].
3. Mognato, E., Brocca, S., & Comiati, F. (2018). Which is the right reference surface compression value for heat treated glass. *Challenging Glass 6*. C. Louter, F. Bos, J. Belis, et al. (Eds.). P. 703–712 [in English]. <https://doi.org/10.7480/cgc.6>.
4. Veer, F.A. & Rodichev, Y.M. (2014). The relation between pre-stress and failure stress in tempered glass. *Challenging Glass 4 and COST Action TU0905 Final Conference*. C. Louter, F. Bos, J. Belis, J.-P. Lebet (Eds.). Leiden: CRC Press. P. 731–738 [in English].
5. Kalamar, R. & Eliášová, M. (2015). Load Bearing Innovative Construction from Glass. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 96*. P. 12–66. <https://doi.org/10.1088/1757-99X/96/1/012066> [in English].

6. Mould, R.E. (1967). The Strength of Inorganic Glasses. L.J. Bonis, J. J. Duga, J.J. Gilman (Eds), Phenomena in the Materials Sciences, V. 4: *Fracture of Metals Polymers and Glasses*, Plenum Press. P. 119-149. [http://www.americanglassresearch.com/sites/default/files/r009the\\_strength\\_of\\_inorganic\\_glass.pdf](http://www.americanglassresearch.com/sites/default/files/r009the_strength_of_inorganic_glass.pdf). [in English].
7. Costa S., Miranda M., Varum H. & Teixeira-Dias. (2006). On the Evaluation of the Mechanical Behaviour of Structural Glass Elements. *Materials Science Forum* 514-516. P. 799-803. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.799>. [in English].
8. Nielsen, J.H. (2008). Experimental investigation of residual stresses in toughened glass. *Challenging Glass I*. F. Bos, C. Louter, and F. Veer (Eds.). Amsterdam: Delft University Press. 2008. P. 387–398 [in English].
9. Rodichev, Yu.M. (2015). Defekty poverhnosti i prochnost' listovogo stekla pri ciklicheskom i dlitel'nom staticheskom nagruzhennii. [Surface defects and strength of sheet glass under cyclic and long-term static loading]. *Problemy prochnosti – Strength problems*, 2, 101–115 [in Russian].
10. Zubkov, V. & Kondratieva, N. (2010). Flat glass strength in facade systems coverings and floorings of buildings and structures. *Glass. Facade. Energy. Dusseldorf (Germany)*. P. 63–70 [in English].
11. Veer, F.A. & Rodichev, Y.M. (2016). Improving the engineering strength of heat strengthened glass. *Heron*. 61, No. 2. P. 121–138 [in English].

**Hennadii Portnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Stand Model for the Study of Sheet Glass Structures**

The use of sheet glass as a structural material capable of bearing significant loads is complicated by the lack of regulatory documents for calculating the stress-strain state. This is primarily due to the variability of the strength characteristics of sheet glass. In practice, these necessary indicators are obtained by conducting full-scale research. A large number of factors that affect the strength of glass makes the test results statically heterogeneous, which leads to a high cost of research. The use of the capabilities of modern 3D modeling software systems can significantly reduce the cost of testing by virtually simulating the impact on the model of the structural element. The glass plate model is free of production defects, so its study allows for determining the general direction of the influence of structural factors on the structure's performance and its optimization.

This paper presents a stand model developed in the SOLIDWORKS environment for the study of sheet glass structures under the action of uniformly distributed pressure. Analyzing the model in the SOLIDWORKS Simulation module according to the proposed settings allows to study of the stress state of flat glass depending on the parameters of the rubber gasket and to justify the design of the support unit. The model allows to estimate of the stress-strain state of structural elements based on the Mohr-Coulomb failure criterion (for a glass plate), and stresses (according to Mise, and others) for support elements. The above settings of the program ensure its conflict-free operation with low machine resource consumption. There is a possibility of variations in the design of the support unit, including taking into account the conditions of fixing (friction) elements. The localization of critical stresses in the glass plate coincides with the data from field experiments, which indicates the adequacy of the model.

The developed model of the stand allows for the investigation of the stressed state of sheet glass under uniform load conditions, depending on the parameters of the rubber gasket.

**sheet glass, support unit, 3D modeling, failure criterion, Mohr-Coulomb stress criterion**

*Одержано (Received) 25.11.2022*

*Прорецензовано (Reviewed) 13.12.2022*

*Прийнято до друку (Approved) 29.12.2022*