

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПО ТОЛЩИНЕ
АЭРОДРОМНЫХ ПЛИТ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-
КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А. Ю. Конопляник, к. т. н., доц., Е. Д. Семенов, студ.

Ключевые слова: аэродромные плиты, температура, температурно-климатические воздействия, температурные поля, распределение температур

Постановка проблемы. Большинство железобетонных конструкций зданий и сооружений, в частности, работающих на открытом воздухе, испытывают на себе влияние температурно-климатических воздействий, связанных с изменением суточных и сезонных температур, различной солнечной радиации, влажности воздуха, скорости ветра и др. С учетом физической нелинейности бетона, под влиянием таких воздействий в железобетонных конструкциях могут возникать значительные температурные напряжения, связанные в основном с различием коэффициента линейной температурной деформации цементного камня, зерен заполнителя и арматуры.

В зависимости от условий работы конструкции на нее действуют различные постоянные и временные нагрузки, которые в сочетании с температурно-климатическими воздействиями могут достигать значительных величин.

На монолитные железобетонные плиты взлетно-посадочных полос аэродромов могут действовать, в зависимости от времени года, как максимальные положительные и отрицательные температуры, так и промежуточные температуры, которые зависят от времени года. В зависимости от температуры воздуха различной оказывается и температура по толщине плит. Учитывая изменения суточных температур, можно говорить об имеющем место нестационарном температурном режиме и соответствующем ему температурном поле по толщине бетона конструкции.

Современные расчеты конструкций связаны с применением программно-вычислительных комплексов. Одним из таких комплексов является ПК ЛИРА [1], который позволяет определять температурные усилия по толщине плиты в зависимости от разницы температур на наружной и внутренней поверхности бетона. Таким образом, основным условием для правильного расчета является определение распределения температур по толщине сечения элемента.

Анализ публикаций. Интересным является подход различных авторов к решению этой проблемы. Так, авторы нормативного документа [2, с. 29 – 31] предлагают определять перепад температур по сечению элемента по эмпирическим формулам в зависимости от средних температур в холодное и теплое время года, равных -20°C и $+28^{\circ}\text{C}$, а также учитывать влияние солнечной радиации на поверхность бетона. Такой подход, по нашему мнению, не совсем корректен, так как предусматривает представлять конструкцию как однослойную, т. е. с одинаковыми теплотехническими показателями бетона по толщине плиты. В действительности необходимо знать теплотехнические показатели и температуру каждого из входящих по толщине конструкции слоев.

Г. И. Глушков в работе [3] утверждает, что для расчета аэродромных плит необходимы следующие параметры температурного режима: суточный перепад средней температуры бетонной плиты, т. е. разность между максимальной и минимальной средней по высоте температурами плиты в течение суток, сезонный перепад средней температуры бетонной плиты, максимальные температурные градиенты по толщине плиты – разность температур верха и подошвы плиты, отнесенная к толщине плиты. При этом для расчетов используются формулы, учитывающие среднемесячные и среднедневные температуры воздуха, а также эмпирические коэффициенты, зависящие от температуропроводности бетона. По нашему мнению, такие расчеты очень усреднены, так как не позволяют учитывать значительное колебание температур за короткий промежуток времени. Кроме этого, отсутствуют данные по фактическому измерению температур по толщине плит и их связи с приведенными формулами.

А. Ф. Милованов в работе [4] на примере пожара утверждает, что изменение температур по толщине конструкции зависит от теплотехнических свойств различных слоев бетона и должно рассчитываться с учетом попеременного во времени положения поверхности сухого и влажного слоев бетона. Однако этот расчет трудоемок и поэтому мало рационален для практических расчетов. При этом Милованов утверждает, что решить задачу расчета

нестационарного температурного поля можно методом конечных разностей при упрощенных граничных условиях. Однако такой теплотехнический расчет в полной мере точен, когда подкрепляется экспериментальными кривыми прогрева бетона [4, с. 10]. Кроме того, по нашему мнению, такие упрощенные граничные условия могут быть применены при температурах более 300°C, когда свойства бетона более прогнозируемы из-за его структурообразования, связанного с потерей физически связанной воды цементного камня.

Для теплотехнического расчета железобетонных конструкций необходимо иметь данные об изменении теплофизических свойств бетона при нестационарном нагреве, а также температурные поля по сечению рассматриваемого элемента [4, с. 11].

Многолетний опыт научного руководителя работы по проектированию различных видов жаростойких бетонов для металлургических агрегатов и конструкций показал, что наиболее точных расчетных теплотехнических показателей бетона можно достигнуть только путем практического измерения температур по толщине бетона. Это наглядно продемонстрировано в работе [5], когда, установив по толщине бетона футеровки прибыльных надставок 11 термодар, получили кривые нестационарного температурного поля при разливке металла. Полученные кривые с совокупности с исследованными в лабораторных условиях свойствами бетона позволили рассчитать все необходимые теплофизические характеристики бетона.

Авторы работы [6] приводят эпюру распределения температуры по толщине четырехслойной конструкции, состоящей из трех слоев дорожной одежды, уложенной на армированную плиту мостового сооружения. При этом график распределения температур по толщине всех слоев, составляющей 335 мм, приведен для стационарного температурного режима, а расчетное уравнение – для нестационарного температурного режима. Кроме этого, в работе не приводятся теплотехнические характеристики каждого из слоев, и вызывает сомнение температурный перепад по толщине всей конструкции, который составляет 35°C.

С. А. Буянов и О. В. Кантур в работе [7] при расчете температурных напряжений аэродромных плит говорят о неизвестности распределения температуры по их толщине. При этом для расчета сами принимают температуру замыкания, а расчет ведут по нормативным средним летним и зимним температурам в сечениях плит и соответствующим им температурным перепадам. Кроме того, при расчете принимают одинаковый коэффициент теплопроводности бетона при летних и зимних температурах.

Анализ публикаций [1 – 7] показал, что железобетонные аэродромные плиты могут быть рассчитаны на температурно-климатические воздействия, когда имеются данные о распределении температур по толщине бетона плит и теплофизические характеристики слоев бетона. Поскольку в литературе нет обобщенных данных по распределению температур по толщине аэродромных плит при конкретной температуре воздуха и теплофизических характеристиках каждого из слоев бетона по толщине плит, необходимо найти соответствующие методы решения этой проблемы.

Цель и задача исследований состояла в определении распределения температур по толщине аэродромных плит при различной температуре воздуха для подготовки исходных данных по расчету этих плит на температурно-климатические воздействия.

Поскольку расчетная схема аэродромных плит представляет собой плиту на упругом основании, то для расчета важно знать характеристику упругого основания, которая может быть определена исходя из характеристик подстилающих слоев.

Изложение материала. Для реализации расчета аэродромных плит на температурно-климатические воздействия в качестве примера была выбрана взлетно-посадочная полоса Харьковского международного аэропорта.

Харьковский аэропорт был модернизирован для проведения Евро-2012 и способен принимать самолеты Airbus A-320, Boeing-737, Douglas MD-80, Embraer 145, Ту-154, ИЛ-76, Як-42 и др.

Взлетно-посадочная полоса аэродрома длиной 2 500 м представляет собой многослойную жесткую конструкцию, которая состоит из:

- грунтовой основы – суглинка пылеватого с коэффициентом постели $k_s = 70 \text{ МН/м}^3$;
- искусственной основы – грунтоцемента М75 по ДСТУ Б.В.2.7-207: 2009 толщиной $\delta = 150 \text{ мм}$;
- распределительного слоя из полиэтиленовой пленки толщиной $\delta = 300 \text{ мкм}$;
- нижнего слоя покрытия – «песчаного бетона» класса В7,5 (М100) по ДСТУ Б.В.2.7 – 43-93 толщиной $\delta = 300 \text{ мм}$;

- верхнего слоя покрытия – тяжелого бетона класса В30 (М400) по ДСТУ Б.В.2.7 – 43-96 толщиной $\delta = 400$ мм.

Коэффициент теплопроводности верхнего слоя покрытия при нормальной температуре составляет 1,2 Вт/(м · °С).

Конструкция аэродромного покрытия Харьковского международного аэропорта приведена на рисунке 1.

В верхнем слое покрытия из тяжелого бетона устроены швы со штыревыми соединениями. Эти швы делят покрытие на плиты размерами 7,5 × 7,5 м. Таким образом, именно эти плиты будут рассчитаны на температурно-климатические воздействия.

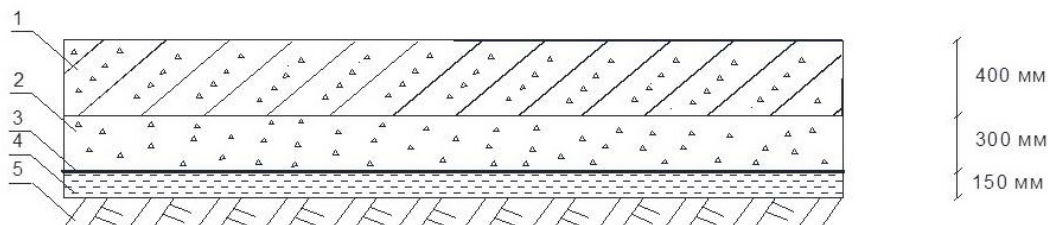


Рис. 1. Конструкция аэродромного покрытия: 1 – тяжелый бетон класса В30, $\delta = 400$ мм; 2 – песчаный бетон класса В7,5, $\delta = 300$ мм; 3 – полиэтиленовая пленка $\delta = 300$ мкм; 4 – грунтоцемент М75, $\delta = 150$ мм; 5 – грунтовая основа из суглинка пылеватого, $k_s = 70$ МН/м³

Поскольку температура окружающего воздуха имеет существенные различия в различное время суток, месяца, сезона и года, то для практических расчетов принимали абсолютную максимальную и минимальную температуру воздуха и ее промежуточные значения. Так, по данным многолетних наблюдений для г. Харькова абсолютный min (-35,6°С) зафиксирован в январе 1940 г., а абсолютный max (+39,8°С) в июне 1998 г. В метеосводках за июль 2010 г. имеются данные, что в отдельные дни температура воздуха в районе г. Харькова достигала 42°С. Поскольку максимальная положительная температура воздуха фиксируется в тени, то на солнце эта температура достигает за городом 55°С, а в городе – выше 55°С.

Таким образом, для практических расчетов были приняты абсолютные и промежуточные значения температур, а именно + 55°, + 20°, 0°, – 20° и – 36°.

Так как температура воздуха фактически изменяется в течение суток, то фактически мы имеем место с нестационарным тепловым потоком, проходящим по толщине плиты. При этом для определения температур по толщине плиты необходимо применение метода конечных разностей при определенных граничных условиях. Поскольку отсутствуют данные об измерении температур по толщине плиты, а также данные о значении коэффициента теплопроводности при этих температурах, то, по нашему мнению, нельзя достигнуть точного решения этого уравнения. В связи этим мы считаем, что расчет температур по толщине плиты можно произвести следующим образом.

1. Поскольку расчетные температуры воздуха могут не изменяться в течение 2 и более часов, тепловой поток, проходящий через аэродромную плиту за это время, можно считать стационарным.

2. Температуру на поверхности покрытия можно определить используя уравнение для конвективной передачи тепла [8, с. 38] без учета поправки к температуре воздуха:

$$T_{\text{п}} - T_{\text{в}} = \frac{\Phi_m - Q}{\alpha_q}, \quad (1)$$

где: $\Phi_m - Q$ – количество теплоты, поглощаемой поверхностью, Вт/м²;

$T_{\text{п}}$ – температура наружной поверхности покрытия, °С;

$T_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;

α_q – коэффициент теплообмена, принимаемый в зависимости от скорости ветра, Вт/(м² · °С).

3. Распределение температур по толщине плиты находим используя уравнение [8, с. 18].

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где: $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – производная температуры по времени;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – производная температуры по координате;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{°C}$.

Учитывая условия стационарного теплового потока, т. е. $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$,

уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Задавая граничные условия ($x=0, t=t_1$; $x=h, t=t_2$), интегрируя уравнение (5) и используя закон Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \text{ получаем } t_i = t_1 - \frac{q}{\lambda} z, \quad (4)$$

где: h – толщина плиты, м;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$;

z – толщина слоя, для которого определяется температура, м.

Расчет распределения температур по толщине плиты при температуре воздуха +55°С

Коэффициент теплопроводности λ бетона определяли согласно источнику [10, табл. 7]. Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной +55°С, принимается равным 1,5 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.

Коэффициент теплообмена α_q при средней скорости ветра, равной 4,1 м/с, составил 12,14 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, а температура на поверхности бетона плиты +57,57°. Распределение температур по толщине аэродромной плиты приведено на рисунке 2.

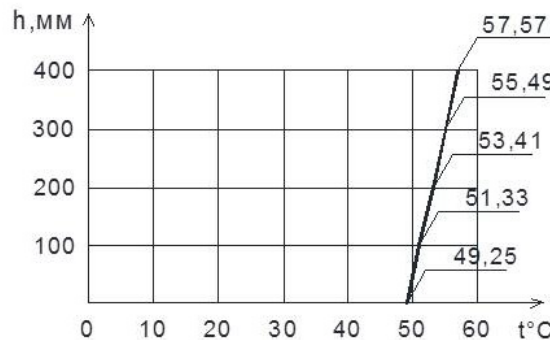


Рис. 2. Распределение температур по толщине аэродромной плиты при температуре воздуха +55°С

Расчет распределения температур по толщине плиты при температуре воздуха +20°С

Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной +20°С, составляет 1,2 $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$. Коэффициент теплообмена α_q при средней скорости ветра, равной 5,2 м/с, составил 15,54 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, а температура на поверхности бетона плиты – +21,62°С. Распределение температур по толщине аэродромной плиты приведено на рисунке 3.

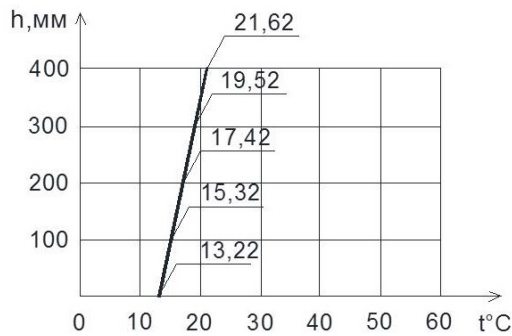


Рис. 3. Распределение температур по толщине асфальтобетонной плиты при температуре воздуха +20°C

Расчет распределения температур по толщине плиты при температуре воздуха 0°C. Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной 0°C, определяли используя уравнение [10, с. 28]:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_t}{1 + \beta \cdot t}, \quad (5)$$

где: λ_t – коэффициент теплопроводности материала при t °C, Вт/(м · °C);

λ_0 – коэффициент теплопроводности материала при $t = 0$ °C, Вт/(м · °C);

t – температура материала, при которой коэффициент теплопроводности равен λ_t , °C;

β – коэффициент, принимаемый для тяжелого бетона, – 0,0025.

Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной 0°C, составил 1,14 Вт/(м·°C).

Коэффициент теплообмена α_q при средней скорости ветра равной 5,4 м/с составил 16,28 Вт/(м²·°C), а температура на поверхности бетона плиты + 0,39°. Распределение температур по толщине асфальтобетонной плиты приведено на рисунке 4.

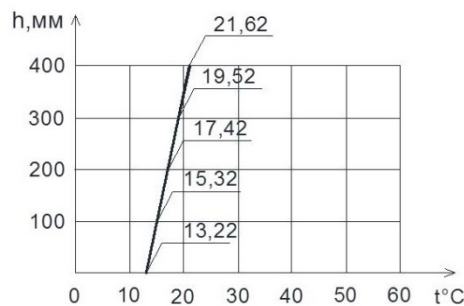


Рис. 4. Распределение температур по толщине асфальтобетонной плиты при температуре воздуха 0°C

Расчет распределения температур по толщине плиты при температуре воздуха -20°C. Поскольку в литературных источниках отсутствуют данные об изменении коэффициента теплопроводности бетонов при низких температурах, коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной -20°C, определяли из предпосылки, что при данной температуре воздуха в бетоне плиты остается до 5 % химически связанной и до 3 % физически связанной воды, которая превращается в лед. Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха равной -20°C составил 1,27 Вт/(м·°C).

Коэффициент теплообмена α_q при средней скорости ветра, равной 5,6 м/с, составил 17,02 Вт/(м²·°C), а температура на поверхности бетона плиты -19,66°C. Распределение температур по толщине асфальтобетонной плиты приведено на рисунке 5.

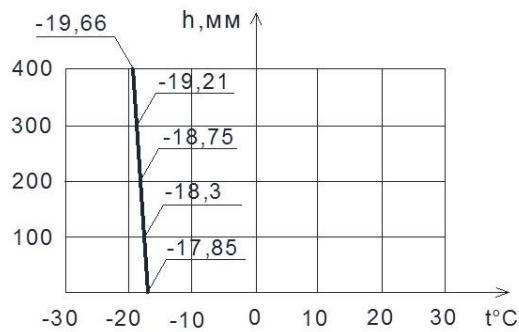


Рис. 5. Распределение температур по толщине аэродромной плиты при температуре воздуха -20°C

Расчет распределения температур по толщине плиты при температуре воздуха -36°C . Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной -36°C , определяли из условия, что при данной температуре воздуха в бетоне плиты остается только до 5 % химически связанной воды, которая превращается в лед. Коэффициент теплопроводности бетона при температуре наружного воздуха, равной -36°C , составил $1,24 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Коэффициент теплообмена α_q при средней скорости ветра, равной $5,6 \text{ м}/\text{с}$, составил $17,02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, а температура на поверхности бетона плиты $-35,66^{\circ}\text{C}$. Распределение температур по толщине аэродромной плиты приведено на рисунке 6.

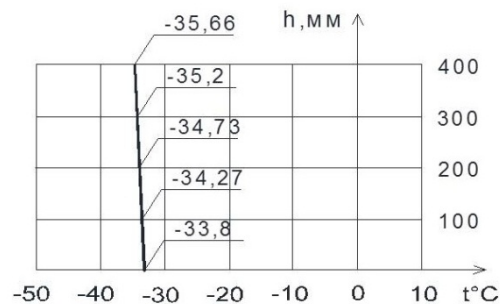


Рис. 6. Распределение температур по толщине аэродромной плиты при температуре воздуха -36°C

Выводы. Анализ путей расчета температур по толщине железобетонных конструкций показал сложность и неоднозначность каждого конкретного пути решения. При этом нет единого подхода к расчету температур. Было рассчитано распределение температур по толщине аэродромной плиты при двух экстремальных и трех промежуточных значениях температур воздуха.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Городецкий А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций: учеб. пособ. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
2. Нагрузки и воздействия. ДБН В.1.2-2:2006. – К. : Минстрой Украины, 2006. – 59 с.
3. Глушков Г. И. Изыскания и проектирования аэродромов: учеб. для вузов / Г. И. Глушков, В. Ф. Бабков, В. Е. Тригонни др. – М. : Транспорт, 1992. – 463 с.
4. Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М. : Стройиздат, 1986. – 224 с.
5. Конопляник А. Ю. Исследование износа монолитных футеровок прибыльных надставок / А. Ю. Конопляник, А. А. Бородин, А. И. Белкин, Т. И. Филатова // Металлургич. и горноруд. пром-сть. – 1998. – № 2. – С. 29 – 32.

6. Моделирование напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции при совместном действии нагрузки, температуры и агрессивной среды применительно к дорожным покрытиям на мостовых сооружениях / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников,

Е. В. Зинченко [Электронный ресурс] // Режим доступа: www.rosdornii.ru/files/dorogi-i-mosti/29-1-13/4-3.pdf

7. Моделирование температурных напряжений в железобетонных плитах покрытия аэродромов средствами SCAD / С. А. Буянов, О. В. Кантур [Электронный ресурс] // Режим доступа: www.katriel.ru/aero.pdf

8. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

9. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. СНиП 2.03.04 – 84. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 54 с.

10. **Фокин К. Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М. : Стройиздат, 1973. – 287 с.

УДК 629.017

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАКУУМНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ТА ГГЦ ГАЛЬМІВНОЇ СИСТЕМИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

М. В. Дячук, к. т. н, доц., Д. І. Петренко, наук. здобувач, А. П. Димихін, маг.

Ключові слова: імітаційне моделювання, гальмівна система, вакуумний підсилювач, головний гальмівний циліндр

Актуальність. Наразі з метою відповідності підвищеним вимогам безпеки автомобіль оснащується різними електронними системами контролю типу ABS/ESP. За даними Національної адміністрації безпеки руху (NHTSA), у США [1] застосування таких систем показало зменшення кількості аварій: для автомобілів з ABS на 7 %, з ESP – на 34 %.

Функціонування таких активних систем безпеки базується на приладах гальмівної системи автомобіля. Розробка алгоритмів функціонування таких систем повинна ґрунтуватися на імітаційних моделях, які більш повно описують конструктивні особливості компонентів гальмівної системи.

Аналіз досліджень. Сучасні праці [2; 3] не відрізняються доступним описом фізичного моделювання компонентів гальмівних систем. У багатьох із них [4; 5] застосовується логіко-математичне моделювання активних систем безпеки, яке не враховує особливостей конструкції гальмівного керування, робочих процесів та їх фізичних параметрів.

Мета статті. Методом імітаційно-фізичного моделювання дослідити робочий процес вакуумного підсилювача з головним гальмівним циліндром (ГГЦ) шляхом впливу на гальмівну педаль силою з певним законом. Представити Simscare модель вакуумного підсилювача з ГГЦ.

Постановка завдання. У рамках розробки повної імітаційно-фізичної моделі гальмівного керування легкового автомобіля окремим завданням даної роботи є складання підсистеми «гальмівна педаль – підсилювач – головний гальмівний циліндр». Вимога до моделі – максимальне врахування елементів реального вузла.

Прийняті допущення. При моделюванні прийняті такі допущення: в'язкість, щільність і температура робочої рідини незмінні; відсутні витоки рідини; створюється фіксоване розрідження в камерах підсилювача.

Основна частина. У створенні тиску робочої рідини в гідростатичному гальмівному приводі беруть участь гальмівна педаль, вакуумний підсилювач, головний гальмівний циліндр. За об'єкт моделювання були обрані компоненти гальмівної системи легкового автомобіля, а саме:

- робочою рідиною виступає гальмівна рідина DOT 4;
- педаль гальм забезпечує кінематичне передатне відношення 5,5;
- двопоршневий підсилювач вакуумного типу з пружно-еластичним слідкувальним пристроєм;
- головний гальмівний циліндр типу «тандем» з автономним живленням гальмівною рідиною для двоконтурної гальмівної системи.

Геометричні параметри компонентів гальмівної системи наведено в таблиці 1.