

5. The report «Seismic risk and possible effects of the predicted strong earthquakes, secondary seismic hazards and the readiness of the Republic to eliminate them». – Makhachkala, MES of Dagestan, 2001. -74 p.
6. Abakarov A.D., Kurbanov I.B. Method for rapid assessment of technical condition of buildings in seismic areas. Earthquake engineering. Safety of structures. – 2007, №2. – pp. 31-34.
7. Perelmuter A. V. Selected problems of reliability and safety of building structures. - M.: Publishing house of the DIA, 2007. – 256 p.

УДК 624.74:624.075

Агапов В. П., Айдемиров К. Р.

РАСЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФЕРМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Agapov V.P., Aidemirov K.R.

CALCULATION OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE FARMS BY FINITE ELEMENT METHOD TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NON-LINEARITY

Аннотация. Рассматривается методика расчета предварительно напряженных железобетонных ферм с учетом физической нелинейности. Предварительное напряжение моделируется за счет задания температурного воздействия на арматуру стержней. Приводятся расчетные формулы, позволяющие определить необходимое для достижения заданного уровня предварительного напряжения значение температуры. Используемый авторами алгоритм нелинейного расчета основан на разработанной ранее и внедренной в вычислительный комплекс ПРИНС методике физически нелинейного расчета железобетонных ферм без предварительного напряжения арматуры. В качестве примера рассматривается расчет предварительно напряженной фермы на двух опорах с полигональным очертанием верхнего пояса. Нагрузка прикладывается в виде сосредоточенных сил в узлах верхнего пояса. Для всех стержней принята одинаковая площадь поперечного сечения и одинаковый коэффициент армирования. Нагружение температурой осуществлялось за один шаг, а нагрузка прикладывалась частями, равными одной десятой части от номинального значения. Приводятся и анализируются результаты расчета.

Ключевые слова: железобетонные фермы, армирование, метод конечных элементов, физическая нелинейность.

Abstract. Considered is the method of calculation of prestressed reinforced concrete farms taking into account physical nonlinearity. Prestress is modeled due to the thermal effect on the core crab. Rating formulae, allowing to define the temperature value necessary for the achieving the given prestress level are given

The nonlinear calculation algorithm used by the authors is based on the earlier developed and implemented into the computer system PRINS method of physically nonlinear calculation of reinforced farms without prestress of the armature. As an example is considered the calculation of prestressed farm on two supports with polygonal contour of the top belt. Load is applied in the form of concentrated forces in the top belt units. For all cores is accepted the same cross section area and the same ratio of reinforcement. Thermal loading was carried out for one step and load was applied in parts equal the one tenth of the nominal value. Calculation results are analyzed and presented.

Key words: reinforced farms, reinforcement, finite elements method, physical nonlinearity.

Введение. В работе [1] были рассмотрены теоретические основы расчета железобетонных ферм без предварительного напряжения арматуры методом конечных элементов с учетом физической нелинейности. Однако на практике чаще применяются предварительно напряженные фермы [2,3].

Постановка задачи. Рассмотрим методику расчета таких ферм.

Предварительное напряжение в бетоне при использовании шарнирно-стержневой модели конструкции можно создать за счет приложения температуры. На рисунке 1 изображен отдельный железобетонный стержень, закрепленный с двух сторон. Если охладить арматурный стержень на t градусов Цельсия, то в нем возникнет усилие, которое может быть найдено из формулы $\Delta l_a = \alpha_a t l = \frac{N_a l}{E_a A_a}$, следовательно $N_a = \alpha_a t E_a A_a$, где α_a – коэффициент линейного температурного расширения арматурной стали, E_a – модуль упругости арматурной стали, A_a – площадь сечения арматурного стержня.

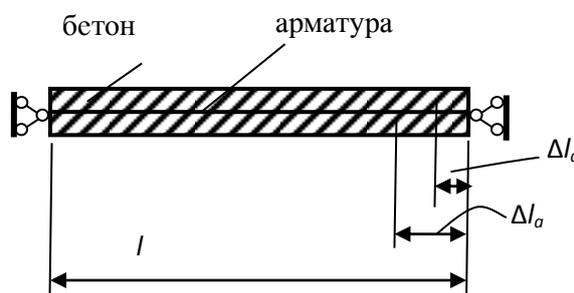


Рисунок 1- Железобетонный стержень, закрепленный с двух сторон

Это усилие будет сжимать стержень. Если освободить один из концов стержня, например, правый, то под действием силы N_a стержень укоротится на

$$\Delta l_c = \frac{N_a l}{(E_a A_a + E_o A_o)}.$$

При этом в бетоне возникнет сжимающее усилие

$$N_o = -\frac{N_a E_o A_o}{(E_a A_a + E_o A_o)} = -\frac{\alpha t E_a A_a E_o A_o}{(E_a A_a + E_o A_o)}. \quad (1)$$

Усилие в арматурном стержне уменьшится на величину $\frac{\alpha t (E_a A_a)^2}{(E_a A_a + E_o A_o)}$ и станет равным $\bar{N}_a = \alpha t E_a A_a - \frac{\alpha t (E_a A_a)^2}{(E_a A_a + E_o A_o)}$.

Не трудно убедиться, что суммарное усилие в стержне будет равно нулю, т.е. напряженное состояние стержня будет самоуравновешенным.

Из формулы (1) можно найти температуру, необходимую для достижения требуемого значения усилия предварительного напряжения.

Методы исследования. Методика расчета железобетонной фермы с учетом предварительного напряжения заключается в следующем.

На первом этапе на арматуру напрягаемых стержней задается температурное воздействие и итерационным методом решается система уравнений

$$(K_0 + \Delta K)u = P_t, \quad (2)$$

где K_0 – матрица жесткости конструкции, подсчитываемая при начальных значениях модулей упругости бетона и арматуры, ΔK – приращение матрицы жесткости за счет изменения свойств материала на шаге нагружения, u_i – вектор узловых перемещений от температурного воздействия P_t – вектор узловых сил, обусловленных температурными воздействиями в конструкции с несмещающимися узлами.

По найденным узловым перемещениям находятся усилия и напряжения в элементах конструкции (усилия предварительного напряжения).

На последующих этапах к конструкции прикладывается внешняя нагрузка, и шагово-итерационным методом по методике, описанной в работе [1], осуществляется физически нелинейный расчет.

В качестве примера рассмотрим расчет фермы, приведенной на рис.2.

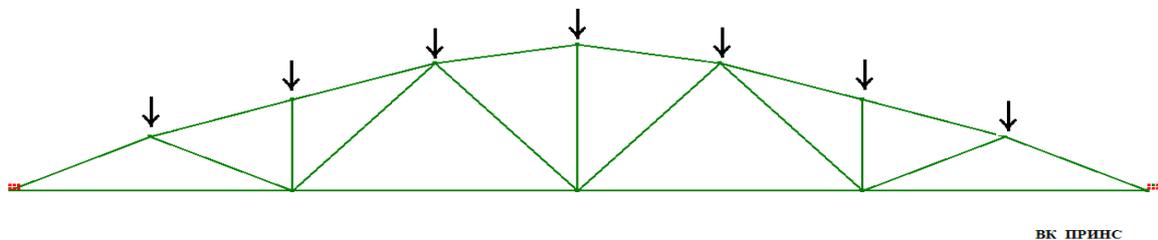


Рисунок 2. – Расчетная схема фермы

В работе [1] эта ферма была рассчитана без учета предварительного напряжения при следующих исходных данных:

Длина фермы $l = 12$ м, высота $h = 2$ м; площадь сечения бетона для всех стержней $A_b = 400 \text{ см}^2$, площадь сечения арматуры $A_a = 10 \text{ см}^2$; бетон тяжелый класса В30, арматура класса А400; ферма нагружалась сосредоточенными силами $P = 20 \text{ кН}$ в узлах верхнего пояса, при этом нагрузка разбивалась на 10 шагов.

Характеристики материалов устанавливались на основании рекомендаций российских и европейских строительных норм и правил [4-6]. В ходе исследования было определено, что трещины в стержнях нижнего пояса возникают при нагрузке, равной $0,6P$.

Обсуждение результатов. Поскольку в одной статье невозможно отразить всю совокупность полученных в ходе анализа результатов, поэтому приведем лишь некоторые из них.

В данной статье расчет фермы был проведен с учетом предварительного напряжения стержней нижнего пояса. При этом на арматурных стержнях нижнего пояса задавалась температура, равная 20^0 С .

По формуле (1), учитывая $\alpha = 1,3 \times 10^{-5} \frac{1}{\text{град}}$, $E_b = 3,25 \times 10^7 \text{ КПа}$, $E_a = 2 \times 10^8 \text{ КПа}$, находим $N_b = -45,07 \text{ кН}$.

Внешняя нагрузка прикладывалась шагами по $0,1P$ и при этом было задано 15 шагов.

На рисунке 3 приведена эпюра усилий в бетоне на первом этапе расчета (от температурного воздействия), откуда видно, что усилия предварительного напряжения в точности соответствуют результатам, подсчитанным теоретически.

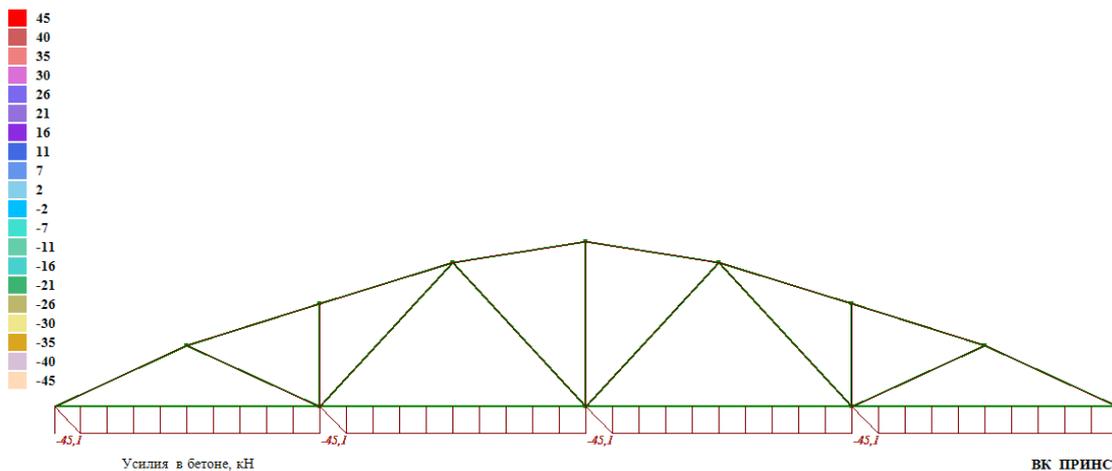


Рисунок 3 – Эпюра усилий в бетоне при температурном воздействии (усилия предварительного напряжения)

На рисунке 4 приведена эпюра полных усилий в стержнях на шаге нагружения, соответствующем 100% внешней нагрузки. Из рис.4 видно, что образование трещин в бетоне нижнего пояса происходит при нагрузке, равной

P , т.е. значительно позже, чем в случае фермы без предварительного напряжения.

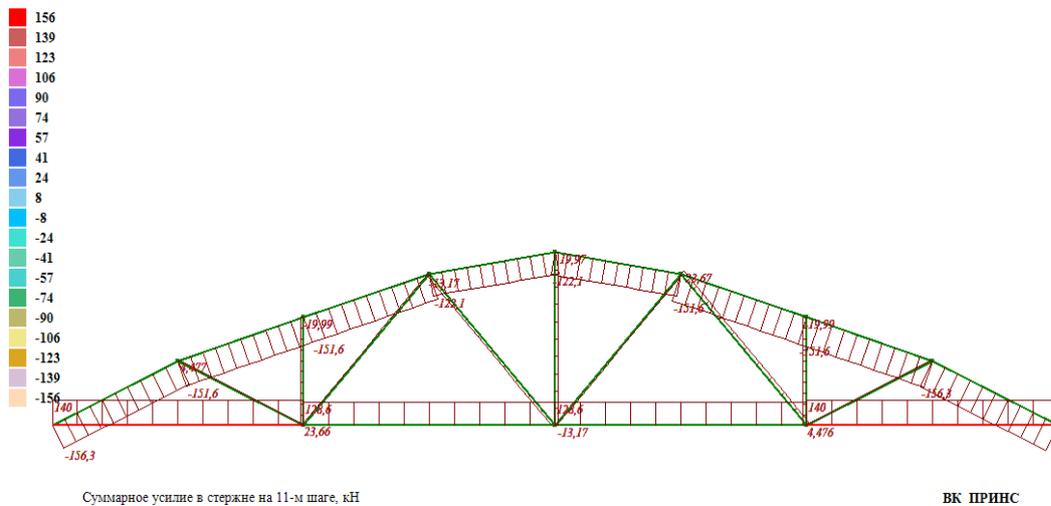


Рисунок 4 – Суммарные усилия в стержнях при номинальном значении нагрузки

На рисунке 5 приведена зависимость прогиба в середине пролета от параметра нагрузки.

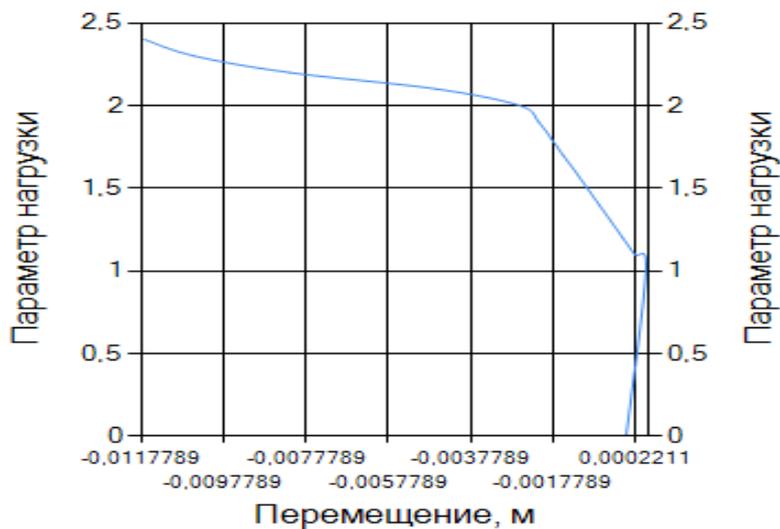


Рисунок 5 – Зависимость прогиба в середине пролета от параметра нагрузки

Значение параметра нагрузки, равное 1, на рис.5 соответствует приложению за один шаг температурного воздействия, значение этого параметра, равное 2, соответствует полному значению полезной нагрузки.

Из рис. 5 видно, что вплоть до возникновения трещин зависимость прогиба от нагрузки носит почти линейный характер. Это объясняется тем, что в

программе учтена прямая разгрузка в предварительно сжатой зоне бетона нижнего пояса.

Вывод. Разработанная программа расчета адаптирована к вычислительному комплексу ПРИНС [7]. Из приведенных результатов видно, что программа ПРИНС дает возможность всесторонне анализировать поведение предварительно напряженных железобетонных ферм под нагрузкой.

Библиографический список:

1. Агапов В.П., Айдемиров К.Р. Расчет железобетонных ферм методом конечных элементов с учетом физической нелинейности //Научное обозрение, 2016. – Ч.1, №2, с.31-34. – Ч.2, №3, с.22-27.
2. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. «Железобетонные конструкции. Общий курс». М.: Стройиздат. - 1991, 728 с.
3. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования. По редакцией Пецольда Т.М. и Тура В.В.- Изд-во БГТУ. - 2003, 379 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры. - СП 52-101-2003.- М., 2005, 53 с.
5. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 - М.: Минрегион России, 2012.
6. Comitee Euro-International De Beton] .Ceb-Fip_Model Cod, 1990. Thomas Telford House, London, 1993.
7. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. - Изд-во АСВ, М., 2005. - 247 с.

References:

1. Agapov V. P., Aidemirov K. R. reinforced concrete design of trusses by finite element method taking into account the physical nonlinearity. Scientific obozrenie, 2016. – CH. 1, No. 2, pp. 31-34. – CH. 2, No. 3, pp. 22-27.
2. Baykov V. N., Sigalov, E. E. Reinforced Concrete structures. General course. M.: Stroyizdat. - 1991, 728 p.
3. Reinforced concrete structures. Fundamentals of theory, calculation and designing of education. Edition Petzold T. M. and Tura V. V. publishing house of BSTU. - 2003, 379 p.
4. Concrete and reinforced concrete structures of heavy and light concrete without prestressing. - SP 52-101-2003.- M., 2005, 53 p.
- 5.SP 63.13330.2012 concrete and reinforced Concrete structures. The main provisions. The updated edition of SNIIP 52-01-2003 - M.: the Ministry of regional development, 2012.
6. Comitee Euro-International De Beton] .Ceb-Fip_Model Cod, 1990. Thomas Telford House, London, 1993.
7. Agapov V. P. finite element Method in statics, dynamics and sustainability-resistance structures. - Publishing house of the DIA, M., 2005. - 247 p.