

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ П-ОБРАЗНОЙ СТАЛЬНОЙ РАМЫ

С.А. Варечкин, О.В. Евдокимцев, В.В. Леденев

Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором Ю.В. Воробьевым

**Ключевые слова и фразы:** горизонтальные перемещения; жесткость узлов; напряженно-деформированное состояние; песчаное основание.

**Аннотация:** Проведен анализ напряженно-деформируемого состояния стальной П-образной рамы и ее совместной работы с основанием в зависимости от жесткости узлов сопряжения ригеля с колоннами. Построены графики напряжений по длине колонн. Результаты, полученные экспериментально, сопоставлены с теоретическими.

Изучение напряженно-деформированного состояния рам при различных параметрах испытаний представляет большой практический интерес [1 – 5]. При анализе полученных экспериментальных данных было проведено их сравнение с теоретическими и с данными других исследований.

Установка для проведения испытаний (рис. 1) состоит из металлического лотка размером 2000 × 2000 × 1200 мм, жесткой упорной балки со стойками и независимой реперной системы. Эксперименты проводили на послойно уплотненном до  $\rho = 1,57 \dots 1,61 \text{ г/см}^3$  песчаном основании. Размеры рамы:  $H/L = 2000/1000 \text{ мм}$ ;  $2 \angle 63 \times 4 \text{ мм}$ ;  $I_p/I_k=1$  ( $H, I_k, L, I_p$  – длины и моменты инерции колонны и ригеля соответственно). Прогибы колонн, ригеля, осадка и боковое перемещение фундаментов измеряли индикаторами часового типа ИЧ-10, фибровые деформации определяли с помощью проволочных тензорезисторов и тензометров системы Аистова, расположенных в характерных точках конструкции (рис. 2).

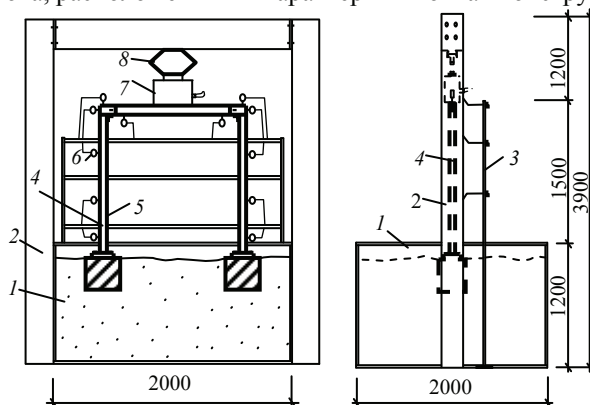
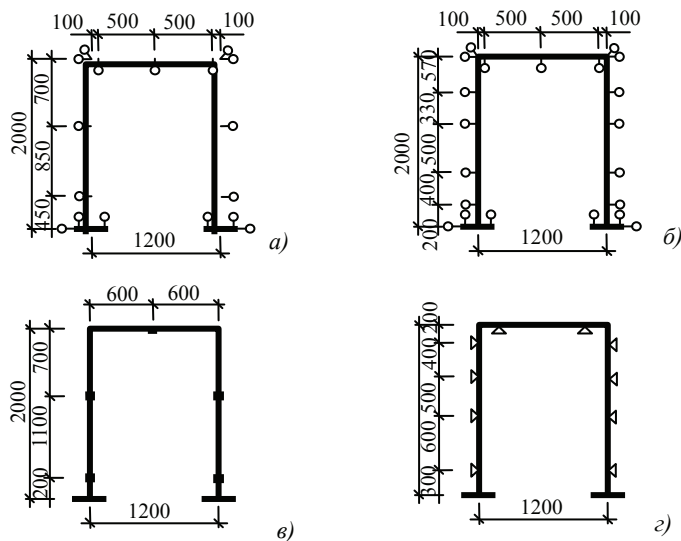


Рис. 1 Схема установки при испытаниях на песчаном основании:

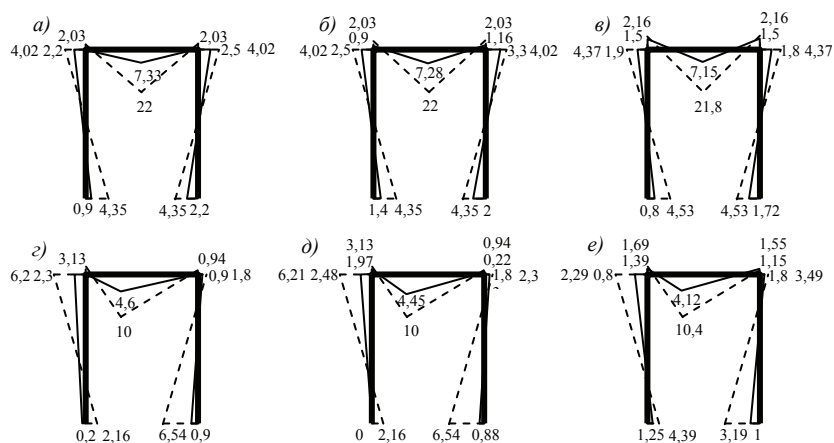
1 – лоток с грунтом; 2 – силовая рама; 3 – реперная система; 4 – П-образная стальная рама; 5 – тензорезисторы; 6 – индикаторы (ИЧ-10); 7 – домкрат; 8 – динамометр



**Рис. 2** Схемы расположения измерительных устройств:  
*а* – прогибомеры – ИЧ-10 (эксперименты на песчаном основании); *б* – прогибомеры – ИЧ-10 (на «жестком основании»); *в* – проволочные петлевые тензометры сопротивления; *г* – тензометры Аистова

Нагрузку на раму создавали гидравлическим домкратом ДГО–63 и увеличивали ступенями с шагом  $0,1F_{\max}$ . Конечные показания приборов снимали через 10... 15 мин после нагружения.

Эксперименты на жестком основании проведены при отсутствии вертикальных, горизонтальных перемещений фундаментов и допущении поворота в уровне подошвы фундамента. С ростом нагрузки деформации и напряжения в элементах рамы растут плавно, без скачков. Максимальные их величины отмечены в ригеле в месте приложения нагрузки, вблизи опор колонны и в узле сопряжения ригеля с колонной (рис. 3). С увеличением жесткости верхних узлов экспериментальные напряжения в ригеле уменьшаются, в колонне, наоборот, увеличиваются. Напряжения в раме не совпадают в дублирующих экспериментах. Невозможность изготовления двух абсолютно одинаковых узлов обуславливает разницу в работе колонн из-за возникновения случайных эксцентриситетов.



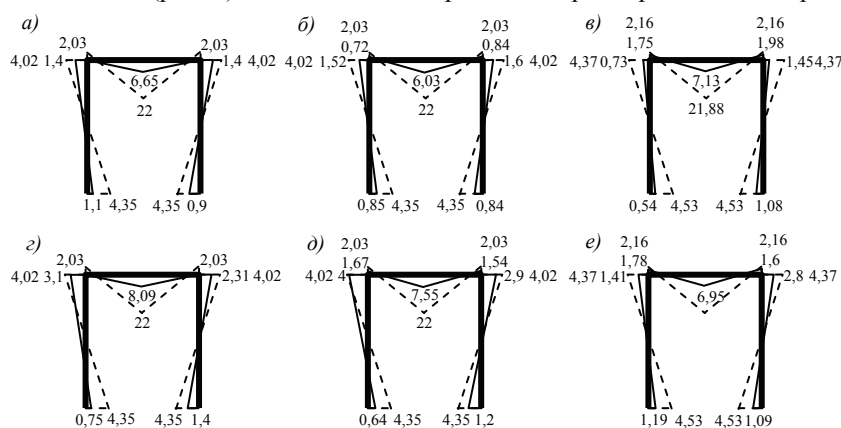
**Рис. 3** Напряжения в раме на жестком основании,  $\sigma$ ,  $\text{kN/cm}^2$ :  
*а* – *в* –  $e_0 = 0$ ; *г*, *д*, *е* –  $e_0 = 0,5$ ;  $F = 30 \text{ kN}$ . Сопряжение ригеля с колонной:  
 шарнирное (*а*, *г*); податливое (*б*, *д*); жесткое (*в*, *е*). —  $\sigma_{\text{эксп}}$  - - -  $\sigma_{\text{теор}}$

При центральном приложении нагрузки (рис. 3, *a – в*) экспериментальные напряжения в ригеле уменьшаются с увеличением жесткости верхних узлов рамы. В стойках наименьшие напряжения соответствуют жесткому сопряжению, а наибольшие – податливому, превосходя первый вариант сопряжения в нижней части для левой колонны в 1,75 раза, правой в 1,28 раза, верхней 1,32 и 1,38 соответственно. Это можно объяснить тем, что при шарнирном соединении стоек с ригелем на колонну действует лишь момент, вызванный приложением силы с эксцентриситетом. При податливом сопряжении на колонну добавляется часть момента, передаваемая с ригеля через узловые накладки и разгружая его. Так как были исключены только линейные перемещения фундамента, а его поворот, возникающий от момента в стойке, возможен, то наибольшее разгружение от поворота может быть получено при максимальном моменте, что соответствовало жесткому узловому сопряжению.

При несимметричном нагружении рамы ( $e_0 = 0,5$ ) напряжения в ригеле так же снижаются с увеличением жесткости верхних узлов (рис. 3, *г – е*). В верхней части колонн максимальными являются эпюры  $\sigma$ , соответствующие податливому сопряжению, в нижней – жесткому. Это объясняется тем, что при жестком сопряжении ригеля с колоннами тангенс угла наклона верхней части колонны (вблизи узла) относительно вертикальной оси меньше, чем при податливом (из-за конструкции узла). Вследствие этого на нижнюю часть колонны действует больший изгибающий момент. При податливом сопряжении (рис. 3, *д*) сила, приложенная к колонне с эксцентриситетом, в большей степени изгибает верхнюю часть колонны.

Сравнивая схемы деформирования конструкции при разных условиях закрепления верхних концов стоек (рис. 3 – 5), можно отметить, что на «жестком основании» при разной жесткости верхних узлов, работа стоек подобна между собой, в то время как для песчаного основания условия закрепления определяют форму, по которой происходит изгиб колонны. Значительно меньше (до 20 %) и горизонтальное смещение верхней части колонн. Это, в свою очередь, увеличивает напряжения в раме в среднем на 31 %. Происходит их перераспределение по длине с увеличением в верхней части на 47 %, в нижней на 12 %, в ригеле, наоборот, уменьшение на 18 %.

На песчаном основании при симметричной нагрузке ( $e_0 = 0$ ) значения напряжений, полученные по результатам экспериментов, в подавляющем большинстве опытов превышают теоретические во всех элементах рамы (табл. 1): при шарнирном сопряжении ригеля с колонной в среднем на 70 %, при податливом – 46 %, жестком – 60 % (рис. 4). Увеличение напряжений при переходе от шарнирного



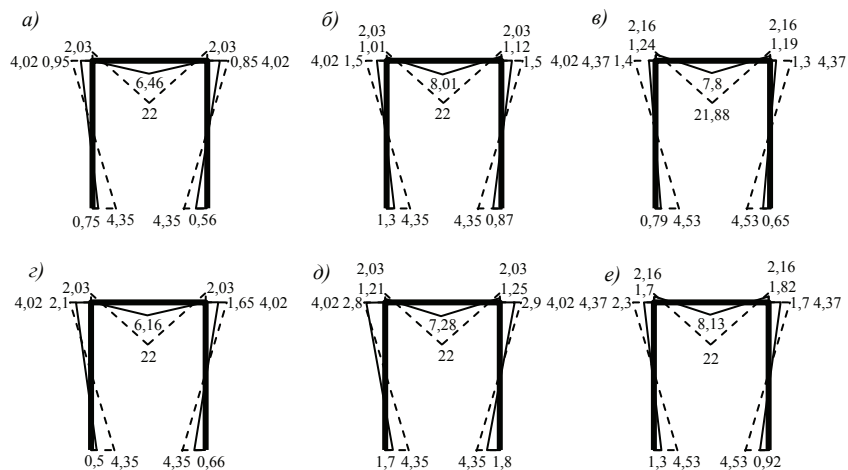
**Рис. 4** Напряжения в раме на песчаном основании,  $\sigma$ ,  $\text{kN/cm}^2$

*a – в* – при  $e = 0$ ,  $F = 30 \text{ kH}$ ,  $\lambda = 0$ ,  $\rho$ ,  $\text{г/см}^3$ : 1,57; *г – е* – 1,61.

Сопряжение ригеля с колонной: шарнирное (*a, г*); податливое

(*б, д*) и жесткое (*в, е*). —  $\sigma_{\text{эксп}}$  - - -  $\sigma_{\text{теор}}$

узла к податливому обусловлено тем, что введение новых связей в узел снижает приспособляемость рамы к деформациям основания. Дальнейшее увеличение жесткости узлов вызывает изменение напряжений в раме и перераспределение усилий.



**Рис. 5 Напряжения в раме на песчаном основании,  $\sigma$ , кН/см<sup>2</sup>:**  
 $a, б, в - e = 0, F = 30 \text{ кН}, \lambda = 1, \rho, \text{ г/см}^3: 1,57; z, д, e - 1,61.$   
 Сопряжение ригеля с колонной: шарнирное ( $a, z$ ); податливое ( $б, д$ ) и жесткое ( $в, e$ ). —  $\sigma_{\text{эксп}}$  - - - -  $\sigma_{\text{теор}}$

Таблица 1

**Среднее отношение экспериментальных деформаций ( $\Delta$ ) и напряжений ( $\sigma$ ) к теоретическим (%)**

$\sigma_e/\sigma_t, \Delta_e/\Delta_t$	Вид сопряжения							Вид основания
	Шарнирное		Податливое		Жесткое			
	ригель	колонна	ригель	колонна	ригель	левая колонна	правая колонна	
$e_0 = 0$								
$\Delta$	64	—	75	—	61	60	60	Песчаное
$\Delta$	55	—	56	—	53	60	60	Жесткое
$\sigma$	59	48	54	41	50	41	41	Песчаное
$\sigma$	67	53	67	45	68	60	60	Жесткое
$e_0 = 0,5$								
$\Delta$	71	—	74	—	73	69	15	Песчаное
$\Delta$	82	—	81	—	77	34	39	Жесткое
$\sigma$	49	52	50	53	61	59	28	Песчаное
$\sigma$	54	73	56	66	60	63	37	Жесткое

$\sigma_e, \sigma_t, \Delta_e, \Delta_t$  – экспериментальные и теоретические напряжения и деформации.

Эпюры, представленные на рис. 4 и 5, показывают, что максимальные напряжения в ригеле могут варьироваться с изменением условий опирания рамы в пределах 7,13...8,09 кН/см<sup>2</sup>.

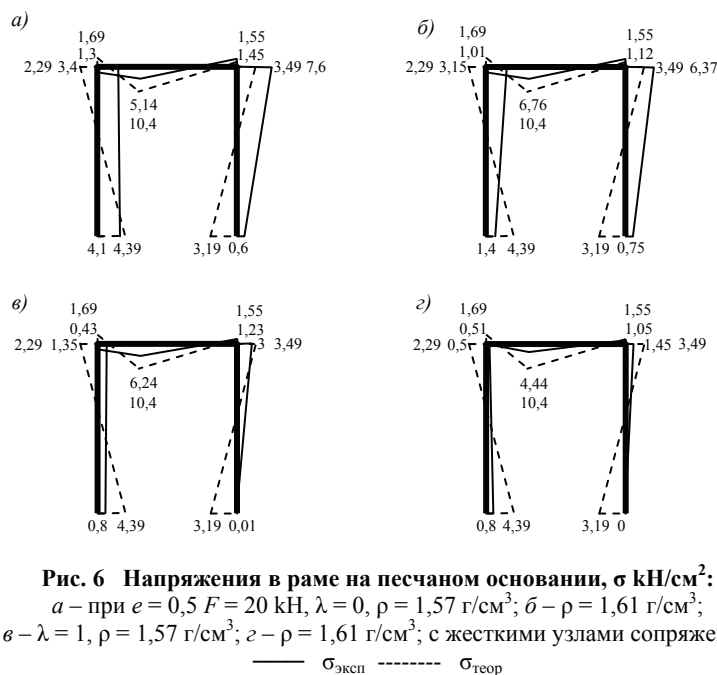
В верхней части колонн при всех вариантах заглубления ( $\lambda = 0...1$ ) и плотности ( $\rho = 1,57...1,61$  г/см<sup>3</sup>) по сравнению с другими видами узлов максимальными являются напряжения в раме с податливыми узлами сопряжения. При  $\lambda = 0$  и 0,5 и одинаковой плотности  $\rho = 1,57$  г/см<sup>3</sup> значения напряжений для правой и левой колонн варьируются от 1,52 до 1,6 кН/см<sup>2</sup>. С увеличением плотности до  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup> при том же заглублении ( $\lambda = 0$ ) напряжения возрастают для левой колонны в 2,6 раза, правой – 1,9. Для  $\lambda = 1$  и  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup> – в 1,86 и 1,88 раза соответственно. В нижней части колонн рамы с податливыми узлами напряжения максимальны (рис. 5, б, д) ( $\lambda = 1$ ,  $\rho = 1,57$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>).

Существенное влияние на деформации оказывает горизонтальное смещение не только фундаментов, но и верхней части рамы в уровне ригеля. Это приводит к изменению работы не только ригеля и колонны, но и к значительному увеличению напряжений в элементах узлов сопряжения. Большой взаимный поворот ригеля относительно колонны в некоторых экспериментах привел к разрыву сварочного шва и значительной деформации накладок в узле. Введение связей по уровню ригеля не полностью исключает такое развитие ситуации. Это происходит из-за перемещений фундамента, которые, в большей степени зависят от характеристик основания и величины заглубления. В опытах  $e_0 \neq 0$  действительные условия закрепления нижнего конца колонны коренным образом отличаются от условий, вытекающих из допущения о несжимаемости основания (жесткая заделка). Колонна в уровне базы имеет не только поворот, но и горизонтальное перемещение, обусловленное поворотом. Это резко меняет схему ее работы под нагрузкой, а в отдельных случаях приводит к перегрузке конструкции, значительному горизонтальному смещению верхней части, и влечет за собой разрушение конструкции сопряжения стойки с ригелем, и быстрое нарастание осадки и крена фундамента. Отсюда следует, что деформации основания существенно изменяют напряженно-деформированное состояние и перемещения колонны. Принципиально важным результатом совместной работы является изменение моментов в уровне подошвы фундамента, а, следовательно, и изменение напряженного состояния самого основания.

При нагружении ригеля вертикальной нагрузкой деформации основания влияют на работу колонн в значительно большей степени, чем на работу ригеля. Чем ближе расположено сечение к подошве фундамента, тем значительнее влияние деформаций основания. В уровне подошвы фундамента фактический момент меньше теоретического в среднем на 60 %, в верхней части колонны – на 40 %.

Это подтверждается и эпюрами напряжений в фибрах элементов конструкции рамы (рис. 6). Изменение плотности с  $\rho = 1,57$  г/см<sup>3</sup> до  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup> при  $\lambda = 0$  приводит к увеличению напряжения в ригеле в 1,3 раза; нижней части левой (наиболее нагруженной) колонны уменьшает в 2,9 раза; правой увеличивает в 1,25; в верхней части напряжения возрастают соответственно в 1,1 и 1,2. При  $\lambda = 1$  напряжения в колоннах намного меньше, чем при  $\lambda = 0$ .

Эпюры напряжений (кроме левой колонны при  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>, которая имеет малые значения  $\sigma = 0,53...0,8$  кН/см<sup>2</sup>) пересекают вертикальную ось колонны. Это свидетельствует о том, что прогибы этих элементов, а так же поворот фундаментов значительно меньше соответствующих  $\lambda = 0$ . В ряде опытов, происходит отрыв подошвы фундамента от основания при значительных нагрузках и эксцентриситетах. Отрыв фундамента от основания следует рассматривать, с одной стороны, как особенность совместной работы основания и надземной конструкции, возникающую вследствие остаточных деформаций в элементах или сопряжениях, с другой стороны, как одну из особенностей совместной работы основания и фундамента, связанную с неравномерным развитием пластических деформаций в грунте при внецентренном нагружении фундамента.



**Рис. 6 Напряжения в раме на песчаном основании,  $\sigma$  кН/см<sup>2</sup>:**

*a* – при  $e = 0,5$   $F = 20$  кН,  $\lambda = 0$ ,  $\rho = 1,57$  г/см<sup>3</sup>; *б* –  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>;  
*в* –  $\lambda = 1$ ,  $\rho = 1,57$  г/см<sup>3</sup>; *г* –  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>; с жесткими узлами сопряжения

—  $\sigma_{\text{эксп}}$  - - - - -  $\sigma_{\text{теор}}$

Величина нагрузки на фундамент, зависит от сопряжения верхнего конца колонны с ригелем. При шарнирном варианте действует только сила с небольшим эксцентриситетом ( $e \leq 0,05$  м), при податливом – дополнительно действует еще часть момента с ригеля. Жесткий узел передает продольную силу и около 90 % момента. Все экспериментальные значения осадки фундаментов меньше теоретических в среднем на 56 %, крена на 81 %, при максимальном заглублении  $\lambda = 1$  и плотности  $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>. Максимальные осадка, крен и боковое перемещение фундаментов соответствовали шарнирному варианту сопряжения ригеля с колонной. При податливом сопряжении ригеля с колонной значения перемещений по сравнению с шарнирным узлом уменьшаются для осадки на 20 %, крена – на 40 % и бокового перемещения – на 28 %. При жестком сопряжении соответственно получим: 18 %, 12 %, 8 %. Значительное уменьшение перемещений фундамента с увеличением его заглубления соответствует плотности основания 1,57 г/см<sup>3</sup>. При большей плотности ( $\rho = 1,61$  г/см<sup>3</sup>) влияние заглубления сказывается в меньшей степени.

При анализе полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Работа рамы на жестком основании дает более близкие к теоретическим результаты, чем на песчаном (хотя несоответствие достаточно велико). Отсюда следует, что применимость результатов расчета конструкций возможна при достаточно несжимаемом основании или увеличенном размере фундаментов.

2. Вследствие поворота фундаментов ( $i$ ) и действия случайных эксцентриситетов ( $e$ ) происходит перераспределение внутренних усилий в раме, что влияет на ее напряженно-деформированное состояние и расчетную схему. Это, в свою очередь, ведет к изменению условий эксплуатации, уменьшению срока нормальной работы конструкций и к непредсказуемости поведения при влиянии дополнительных, трудно учитываемых факторов.

3. Идеализация узлов рам часто условна. Такой прием существенно влияет на работу всей конструкции. Необходим более обоснованный подход к выбору типа идеализированного узла плоской системы. Существующие на данный момент упрощения конструкции могут быть использованы лишь с ограниченным количеством видов узловых соединений.

4. Деформации основания способствуют перераспределению усилий в сечениях конструкций. Уменьшение усилий на анкеры и плиту базы приводит к снижению материалоемкости.

5. Расчет отдельного фундамента по деформациям (существующими на данный момент способами) не отображает реальной работы фундамента в составе рамы.

#### *Список литературы*

1. Беленя Е.И. Исследование совместной работы оснований, фундаментов и поперечных рам стальных каркасов промышленных зданий: Научное сообщение. – М.: ЦНИПС, 1957. – 42 с.

2. Варечкин С.А., Евдокимцев О.В., Леденев В.В. Исследование работы П-образной стальной рамы при податливых сопряжениях ригелей с колоннами и деформируемом основании // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций; Материалы III Международной научно-технической конференции, 27-29 марта 2003 г., Волгоград. В 4-х ч. / Волг. ГАСА. Волгоград, 2003. Ч. I – С. 53 – 56.

3. Жербин М.Н., Романюк В.В. Расчет фланцевых карнизных узлов стальных трехшарнирных рам // Совершенствование методов расчета и проектирования современных видов строительных конструкций: Научно-практ. конф. / 23 – 25 нояб. 1988 г. / Тезисы докладов. – Ровно, 1988. – С. 48 – 49.

4. Мразик А., Шкалоуд М. Расчет и проектирование стальных конструкций с учетом пластических деформаций / Пер. с чешского Поддубного Г.Е. – М.: Стройиздат, 1986. – 456 с.

5. Muhs H. und Kahl H. Ergebnisse von Probebelastungen und groggen Lastflächen zur Ermittlung der Bruchlast im Sand // Deutsche Forschungsgesellschaft. Bodenmechanik. Mitteilungen. Tortschritte und Forschungen im Bauhen, 1957. № 28. S. 55 – 97.

---

### **Tense-Deformed State of П-shaped Steel Frame**

**S.A. Varechkin, O.V. Evdokimtsev, V.V. Ledenev**

*Department “Construction of Buildings and Structures”, TSTU*

**Key words and phrases:** horizontal movements; assembly rigidity; tense-deformed state; sand base.

**Abstract:** Analysis of tense-deformed state of П-shaped steel frame and its joint work with the base depending on the assembly rigidity at junction between crossbar and columns is carried out. Graphs of tensions along the column length are made. The results, obtained experimentally are compared with theoretical ones.

---

### **Spannungsdeformierter Zustand des П-förmigen Stahlrahmens**

**Zusammenfassung:** Es ist die Analyse des spannungsdeformierenden Zustandes des П-förmigen Stahlrahmens, seiner Zusammenarbeit mit der Gründung je nach der Starrheit der Kopplungsknoten des Riegels mit den Säulen durchgeführt. Es sind die

Spannungsdiagramme nach der Säulenlänge aufgebaut. Die experimentell erhaltenen Ergebnisse sind mit den theoretischen Untersuchungen vergleicht.

---

### **Etat de contrainte de déformation du cadre en acier en II**

**Résumé:** Est effectuée l'analyse de l'état de contrainte de déformation du cadre en acier en II de son fonctionnement commun avec le fondement en fonction de la rigidité des centres de la jonction du linteau avec les colonnes. Sont construits les graphiques des contraintes par la longueur des colonnes. Les résultats reçus par expérience sont comparés avec ceux qui ont été reçus théoriquement.

---