

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра железобетонных и каменных конструкций

РАСЧЁТ СТАЛЬНЫХ БАЛОК

Методические указания
к лабораторным занятиям по дисциплине
“Строительные конструкции и механизация строительства”

Для студентов специальности 270800 «Строительство»
Профиль: «Водоснабжение и водоотведение»

КАЗАНЬ 2014 г.

Составитель: К.А. Фабричная.

УДК 624.012

Расчёт стальной балки. Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине “Строительные конструкции и механизация строительства” для студентов специальности 290800 (Водоснабжение и водоотведение)/ Казанский государственный архитектурно-строительный университет; Составитель К.А. Фабричная. Казань, 2014. – 13 с.

Методические указания содержат рекомендации и численные примеры по расчёту стальных прокатных и составных балок. Методические указания предназначены для выполнения лабораторных занятий по дисциплине “Строительные конструкции и механизация строительства” для студентов специальности 290800 (Водоснабжение и водоотведение), а также могут быть использованы при выполнении дипломных проектов. В приложении в табличной форме приведены необходимые для расчётов справочные данные в соответствии с требованиями норм проектирования и стандартами на прокатную сталь.

Рецензент:

Рассмотрена и утверждена на заседании кафедры железобетонных и каменных конструкций КГАСА (протокол № ____ от “__” _____ 2014г.)

Илл. 2; табл. 5.

© Фабричная К.А., 2014.
©Казанский государственный
архитектурно-строительный университет, 2014

Расчёт стальной прокатной балки

Прокатные балки применяют для перекрытия небольших пространств конструктивными элементами ограниченной несущей способности, что связано с имеющейся номенклатурой выпускаемых прокатных профилей.

1. Подбор сечения

Исходными данными для подбора сечения прокатной балки являются геометрические и силовые параметры, а также дополнительные факторы. Геометрические параметры – это схема расположения балок, их пролёт и шаг; силовые – это интенсивность постоянной и технологической нагрузок. К дополнительным факторам относятся условия эксплуатации, тип профиля поперечного сечения и др.

Проектирование и расчёт начинают с анализа предполагаемой конструктивной схемы сооружения или его фрагмента. В результате формируется расчётная схема балки с указанием типов, мест приложения и интенсивности нагрузок. Далее определяют расчётные усилия в форме изгибающих моментов и перерезывающих сил.

При изгибе балки в одной плоскости и упругой работе стали номер прокатного профиля определяют по требуемому моменту сопротивления:

$$W_{req} = \frac{M_{max}}{R_y \gamma_c}, \quad (1)$$

где R_y – расчётное сопротивление стали (приложение №1);
 γ_c – коэффициент условий работы.

В соответствии с принятым типом сечения (двутавр, швеллер и др.) по сортаменту (приложение №2) выбирают ближайший номер профиля, у которого $W > W_{req}$. Принимая во внимание, что при определении расчётных усилий нагрузка от собственного веса балки либо не учитывалась, либо принималась приблизительно, следует выполнить корректировку расчёта с учётом собственного веса балки

При учёте развития пластических деформаций для балок из стали с пределом текучести до 530 МПа расчёт можно выполнять по формуле

$$W_{req} = \frac{M_{max}}{c_1 R_y \gamma_c}, \quad (2)$$

где коэффициент c_1 , учитывающий развитие пластических деформаций, в учебных целях можно принять равным 1,12.

2. Проверка назначенного сечения

Проверки несущей способности и деформативности балки по первой и второй группам предельных состояний следует выполнять по уточнённым нагрузкам и фактическим геометрическим характеристикам.

Проверки на прочность выполняют в точках, где развиваются наибольшие в пределах балки нормальные или касательные напряже-

ния. Как правило, это сечения с максимальным моментом, с максимальной поперечной силой, а также сечения, где приложены сосредоточенные внешние силы.

Проверку на прочность выполняют по следующим формулам:

- В сечениях с $M = M_{max}$

$$\frac{M_{max}}{W_{n,min} R_y g_c} \leq 1, \quad (3)$$

при учёте пластических деформаций следует учесть коэффициент c_1 :

$$\frac{M_{max}}{c_1 W_{n,min} R_y g_c} \leq 1, \quad (4)$$

- В сечениях с $Q = Q_{max}$

$$\frac{Q_{max} S}{I t R_s g_c} \leq 1, \quad (5)$$

Для балок, рассчитываемых с учётом пластических деформаций, а также в опорных сечениях балок

$$\frac{Q_{max} S}{t h R_s g_c} \leq 1, \quad (6)$$

где t и h – толщина и высота стенки балки.

Если проверки на прочность не удовлетворяются, то необходимо принять следующий профиль по сортаменту и выполнить проверки вновь.

Проверка деформативности (жёсткости). Прогобы не должны превышать предельных значений, установленных нормами проектирования

$$f_{max} \leq f_u, \quad (7)$$

Формула для вычисления максимального прогиба балки зависит от схемы загрузки и опирания. Так для свободно опертой на двух опорах балки, загруженной равномерно распределённой нагрузкой максимальный прогиб определяется по формуле

$$f_{max} = \frac{5}{48} \frac{M_{n,max} l^2}{EI}, \quad (8)$$

Необходимо обратить внимание на то, что f_{max} определяется от действия нормативных нагрузок.

При невыполнении проверки на жёсткость необходимо увеличить сечение балки и снова определить f_{max} .

3. Пример расчёта

Подобрать сечение однопролётной шарнирно опертой балки настила из прокатного двутавра. по исходным данным из табл. 1. Пролёт – 6,0 м, нагрузка равномерно распределённая: временная от оборудования $p_n = 26$ кН/м, постоянная $q_n = 1$ кН/м. Рекомендуемая для использования марка стали С245 с $R_y = 24$ кН/см².

Вначале выполним предварительный подбор сечения балки без учёта её собственного веса. Расчётная погонная нагрузка на балку

$$q = p_n \cdot \gamma_{fp} + q_n \cdot \gamma_{fq} = 26 \cdot 1,2 + 1 \cdot 1,05 = 32,25 \text{ кН/м},$$

где $\gamma_{fp} = 1,2$, $\gamma_{fq} = 1,05$ – коэффициенты надёжности по нагрузке для временной и постоянной нагрузок. Изгибающий момент (рис. 1) и требуемый момент сопротивления (при $\gamma_c=1$) будут равны:

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} = \frac{32,25 \times 6^2}{8} = 145,13 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$W_{\text{req}} = \frac{M_{\max}}{c_1 R_s \gamma_c} = \frac{145,13 \cdot 10^2}{1,12 \times 24} = 539,92 \text{ см}^3;$$

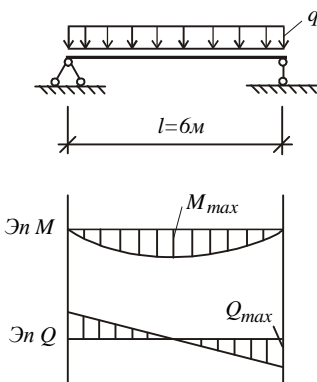


Рис.1 К статическому расчёту балки

Назначаем двутавр № 33 с характеристиками сечения (приложение № 2): $W = 597 \text{ см}^3$, $I_x = 9840 \text{ см}^4$, $S = 339 \text{ см}^3$, $t_w = 0,7 \text{ см}$, собственный вес погонного метра профиля $t = 42,2 \text{ кг/м}$.

Нагрузка от собственного веса балки составит $q_{nb} = 42,2 \times 9,81 \cdot 10^{-3} = 0,414 \text{ кН/м}$. При расчётной нагрузке на балку $q = 32,25 + 0,414 \times 1,05 = 32,69 \text{ кН/м}$, расчётные усилия будут равны: $147,8 \text{ кНм}$ и 98 кН соответственно.

Проверка несущей способности подобранного сечения балки:

а) прочность
$$\frac{M_{\max}}{c_1 W R_s \gamma_c} = \frac{147,08 \cdot 10^2}{1,12 \times 597 \times 24} = 0,933 \leq 1,$$

$$\frac{Q_{\max} S}{I t R_s \gamma_c} = \frac{98,05 \times 339}{9840 \times 0,7 \times 13,92} = 0,347 \leq 1,$$

где $R_s = 0,58 R_y = 0,58 \times 24 = 13,92 \text{ кН/см}^2$.

б) общей устойчивости – общая устойчивость балки обеспечена настилом, опирающимся на её сжатый пояс;

в) местной устойчивости – местную устойчивость прокатных балок не проверяют, поскольку она обеспечена большими толщинами элементов. Что связано с технологией прокатки.

Проверка жёсткости балки:

$$f_{\max} = \frac{5}{48} \frac{M_{n,\max} l^2}{EI} = \frac{5}{48} \frac{123,4 \cdot 10^2 \times (600)^2}{2,06 \cdot 10^4 \times 9840} = 2,28 \text{ см} \leq f_u = 3 \text{ см},$$

где $M_{n,\max} = \frac{q_n l^2}{8} = \frac{27,41 \times 6^2}{8} = 123,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$; – момент от нормативной

нагрузки $q_n = 26 + 1 + 0,414 = 27,41 \text{ кН/м}$; $E = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$ – модуль упругости материала балки (стали); $f_u = 1/200 = 3 \text{ см}$. Жёсткость балки обеспечена.

Исходные данные для расчёта
стальных прокатных балок

Таблица 1

№№ вариантов задач	Пролёт балки l, м	Временная нагрузка от оборудования P_n , кН/м	Постоянная нагрузка от настила q_n , кН/м	Марка стали по ГОСТ 27772-88
1	2	3	4	5
1	5,2	24,8	3,4	C 235
2	5,4	24,6	3,8	C 245
3	5,6	24,2	2,2	C 255
4	5,8	23,8	3,2	C 275
5	6,0	23,4	2,8	C 285
6	6,2	23,8	2,6	C 345
7	6,4	27,2	2,2	C 375
8	6,6	25,2	3,8	C 235
9	6,8	25,6	3,6	C 245
10	7,0	25,8	3,8	C 255
11	5,2	22,0	3,0	C 275
12	5,4	24,2	2,6	C 285
13	5,6	30,4	4,4	C 345
14	5,8	24,6	2,9	C 375
15	6,0	31,8	4,8	C 235
16	6,2	19,2	3,2	C 245
17	6,4	18,4	3,4	C 255
18	6,6	25,6	2,6	C 275
19	6,8	25,4	2,0	C 285
20	7,0	23,2	3,2	C 345
21	5,6	23,4	3,4	C 375
22	5,8	16,6	3,6	C 245
23	6,0	19,8	3,8	C 255
24	6,2	24,8	2,8	C 275
25	6,4	17,8	2,2	C 285

Расчёт стальной составной балки

В тех случаях, когда требуются конструкции, жёсткость и несущая способность которых превышает возможности прокатных профилей, используют составные балки. Они состоят из трёх элементов – верхнего и нижнего поясов, объединённых тонкой стенкой.

1. Подбор сечений элементов балки

Исходными данными для подбора сечения составной балки, также как и для прокатной, являются геометрические и силовые параметры, а также дополнительные факторы.

Жёсткость балки главным образом зависит от её высоты. Наименьшую высоту балки, при которой она будет удовлетворять условиям жёсткости, называют *минимальной высотой*. Она определяется по формуле

$$h_{\min} = \frac{10}{48} \frac{l^2 R_y g_c}{E f_u} \frac{M_n}{M}, \quad (9)$$

Однако с одинаковыми моментами сопротивления можно сделать сколько угодно балок с разными высотами и, следовательно, с различной материалоемкостью. При проектировании нужно определять высоту, при котором расход металла будет минимальным. Такая высота называется *оптимальной*

$$h_{\text{opt}} = k \sqrt[3]{W I_w}, \quad (10)$$

Наконец высота балки связана с условиями перевозки и со строительной высотой конструкции, включающих эту балку. Эту высоту называют *максимальной*.

Коэффициент k принимают для сварных балок равным 1,15...1,2. Для назначения параметра $\lambda_w = h / t_w$ требуется знать толщину или гибкость стенки, которые пока ещё не определены, поэтому можно пользоваться данными таблицы 2.

Таблица 2. Рекомендуемые толщины стенок балок.

h , м	1	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
t_w , мм	8...10	10...12	12...14	16...18	20...22	22...24
h / t_w	100...125	125...150	145...165	165...185	185...200	210...230

Минимальную толщину стенки устанавливают, исходя из условий прочности на срез, предельной гибкости стенки и стандартизации толщин листового проката.

В качестве условия прочности на срез используется формула

$$t_{\min} = k \frac{Q_{\max}}{h R_s g_c}, \quad (11)$$

где $k = S \cdot h / I$, при работе на срез всего двутаврового сечения $k = 1,2$, при работе на срез только стенки $k = 1,5$.

Для предотвращения возможной потери местной устойчивости стенки можно ориентироваться на данные табл.2.

Минимально необходимая площадь сечения одного пояса балки исходя из требования прочности может быть определена по приближённой формуле

$$A_f = \frac{W}{h} - \frac{t_w h}{6} \quad (12)$$

или из равенства

$$I = I_w + I_f, \quad (13)$$

где I , I_w , I_f - соответственно моменты инерции всего составного сечения балки, стенки и полка.

Ширину пояса принимают $b_f = (1/3 \dots 1/5) \cdot h$, но не менее 180 мм. Толщину полки следует назначать в пределах $t_w \leq t_f \leq 3t_w$ и $t_f \leq 40 \text{ мм}$.

2. Проверка прочности сечения балки

Балка в целом должна быть проверена по жёсткости и общей устойчивости; характерные сечения балки – по прочности; элементы балки – по местной устойчивости. Исходными данными для проверок кроме общих данных задачи, ранее уже использованных при подборе сечения, являются фактические геометрические характеристики сечения (I , W , S , h , h_w , t_w , b_f , t_f).

Проверки по прочности сводятся в основном к проверкам нормальных и касательных напряжений. Проверка нормальных напряжений производится по условиям (3) и (4), а касательных – по условиям (5) и (6). Для балок с упругой стадией работы при изгибе в одной плоскости

Проверка местной устойчивости сжатого пояса сводится к обеспечению надлежащим выбором отношения свеса пояса к толщине $b_{ef}/t_f \geq 0,5\sqrt{E/R_y}$, поэтому дополнительная проверка устойчивости не требуется.

Для обеспечения местной устойчивости стенки их укрепляют рёбрами жёсткости, которые устанавливаются по расчёту.

Проверка деформативности (жёсткости) производится по условиям (7) и (8).

3. Пример расчёта

Подобрать сечение стальной однопролётной шарнирно опертой балки покрытия из прокатного двутавра. по исходным данным из табл. 3. Пролёт – 18,0 м, нагрузка равномерно распределённая: нормативная $q_n = 16,5$ кН/м, расчётная $q = 20,9$ кН/м. Рекомендуемая для использования марка стали С345 ($R_y = 33,5$ кН/см². при толщине проката $t = 2 \dots 10$ мм; $R_y = 31,5$ кН/см². при толщине проката $t = 10 \dots 20$ мм). Предельный прогиб балки $f_u = \leq l/250$.

Из статического расчёта получаем:

$$M_{n,max} = 668,25 \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad M_{max} = 846,45 \text{ кН}\cdot\text{м}; \quad Q_{max} = 668,25 \text{ кН}.$$

Требуемый момент сопротивления балки

$$W_{req} = \frac{M_{max}}{R_y g_c} = \frac{846,45 \cdot 10^2}{31,5 \times 1} = 2687 \text{ см}^3;$$

Высота сечения балки: минимальная по жёсткости

$$h_{min} = \frac{l^2 R_y g_c}{5 E f_u} \frac{M_{n,max}}{M_{max}} = \frac{18^2 \cdot 10^4 \times 31,5 \times 1 \times 668,25}{5 \times 2,06 \cdot 10^4 \cdot (1800/250) \cdot 846,45} = 105,7 \text{ см};$$

оптимальная

$$h_{opt} = k \sqrt[3]{W I_w} = 1,15 \sqrt[3]{2687 \times 140} = 83,02 \text{ см},$$

где λ_w принята равной 140.

Минимальная толщина стенки при $h_w = 105$ см

$$t_{min} = k \frac{Q_{max}}{h R_s g_c} = \frac{1,5 \times 156,75}{105 \times 19,43 \times 1} = 0,1 \text{ см},$$

где $R_s = 0,58 R_y = 0,58 \times 33,5 = 19,43 \text{ кН/см}^2$.

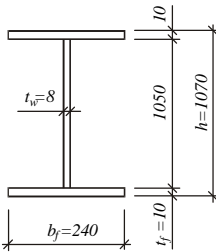


Рис.2 Сечение балки

Принимаем стенку из листа 1050×8 мм. Ширину пояса принимают $b_f = 240$ мм, толщину полки - $t_f = 10$ мм. Тогда высота балки будет равна $h = 1070$ мм.

Геометрические характеристики принятого сечения балки (рис. 2): $I_x = 212007 \text{ см}^4$; $W_x = 3962,7 \text{ см}^3$; $S_x = 2374,5 \text{ см}^3$; $\lambda_w = h_w / t_w = 105 / 0,8 = 131,25$.

Проверка несущей способности балки:

а) прочности $\frac{M_{max}}{W_x R_y g_c} = \frac{846,45 \cdot 10^2}{3962,7 \times 31,5} = 0,678 \leq 1,$

$$\frac{Q_{max} S}{I_x t_w R_s g_c} = \frac{156,75 \times 2374,5}{212007 \times 0,8 \times 19,43} = 0,113 \leq 1,$$

б) местной устойчивости полки

$$\frac{b_{ef}}{t_f} \leq 0,5 \sqrt{\frac{E}{R_y}}; \quad \frac{0,5(240 - 8)}{10} \leq 0,5 \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^4}{31,5}},$$

т.е. $11,6 < 12,9$, местная устойчивость сжатого пояса обеспечена

Проверка жёсткости балки:

$$f_{max} = \frac{5}{48} \frac{M_{n,max} l^2}{EI} = \frac{5}{48} \frac{668,25 \cdot 10^2 \times (1800)^2}{2,06 \cdot 10^4 \times 212007} = 5,16 \text{ см} \leq f_u = 7,20 \text{ см}.$$

Жёсткость балки обеспечена.

Исходные данные для расчёта
стальных составных балок

Таблица 3

№№ вариантов задач	Пролёт балки l , м	Полная норма- тивная нагруз- ка q_n , кН/м	Полная рас- чётная нагрузка q , кН/м	Марка стали по ГОСТ 27772-88
1	2	3	4	5
1	15,0	24,8	29,4	C 235
2	15,0	24,6	30,8	C 245
3	18,0	24,2	28,2	C 255
4	18,0	23,8	30,2	C 275
5	16,0	23,4	25,8	C 285
6	16,0	23,8	27,6	C 345
7	16,0	27,2	32,2	C 375
8	19,0	25,2	30,8	C 235
9	19,0	25,6	31,6	C 245
10	17,0	25,8	29,8	C 255
11	17,0	22,0	26,0	C 275
12	15,0	24,2	27,6	C 285
13	15,0	30,4	34,4	C 345
14	15,0	24,6	29,9	C 375
15	16,0	31,8	37,8	C 235
16	16,0	19,2	23,2	C 245
17	18,0	18,4	25,4	C 255
18	18,0	25,6	28,6	C 275
19	18,0	25,4	29,0	C 285
20	17,0	23,2	28,2	C 345
21	15,0	23,4	30,4	C 375
22	15,0	16,6	21,6	C 245
23	16,0	19,8	23,8	C 255
24	16,0	24,8	28,8	C 275
25	16,0	17,8	20,2	C 285

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 16.13330.2011 (СНиП II-23-81*) Стальные конструкции. Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 96 с.
2. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 1. Элементы стальных конструкций: Учеб. пособие для строит. вузов / В.В.Горев, Б.Ю.Уваров, В.В.Филиппов и др.; под ред. В.В.Горева. – М.: Высш. шк., 1997. - 527 с.
3. Металлические конструкции / Е.И.Беленя, Н.Н.Стрелецкий, Г.С.Ведеников и др.; под ред Е.И.Беленя. – М., 1991.
4. Б.А. Ягупов. Строительные конструкции. Основания и фундаменты: Учебник для ВУЗов – М.: Стройиздат, 1991. – 671 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Нормативные и расчётные сопротивления стали по ГОСТ 27772-88, Мпа

Сталь	Вид проката	Толщина, мм	R _{yn} /R _{un}	R _y	R _p	R _s	R _{wz}	R _{bp}
С 235	лист, фасон.	До 20	23,5 / 35	23	35	13,5	16	47,5
	лист, фасон.	21 – 40	22,5 / 26	22	35	12,5	16	47,5
	лист	41 – 100	21,5 / 36	21	35	12	16	47,5
С 245	лист, фасон.	2 – 20	24,5 / 37	24	36	14	16,5	48,5
	лист	21 – 30	23,5 / 37	23	36	13,5	16,5	48,5
С 255	лист	4 – 10	24,5 / 38	24	37	14	17	50
	фасон.	4 – 10	25,5 / 38	25	37	14,5	17	50
	лист	11 – 20	24,5 / 37	24	36	14	16,5	48,5
	фасон	21 – 40	23,5 / 37	23	36	13,5	16,5	48,5
С 275	лист, фасон.	2 – 10	27,5 / 38	27	37	15,5	17	50
	лист	11 – 20	26,5 / 37	26	36	15	16,5	48,5
	фасон	11 – 20	27,5 / 38	27	37	15,5	17	50
С 285	лист	4 – 10	27,5 / 39	27	38	15,5	17,5	51,5
	лист	11 – 20	26,5 / 38	26	37	15	17	50
	фасон.	4 – 10	28,5 / 40	28	39	16	18	52,5
	фасон.	11 – 20	27,5 / 39	27	38	15,5	17,5	51,5
С 345	лист, фасон.	2 – 10	34,5 / 49	33,5	48	19,5	22	64,5
		11 – 20	35,5 / 47	31,5	46	18	21	62
		21 – 40	30,5 / 46	30	45	17,5	20,5	60,5
С 375	лист, фасон.	2 – 10	37,5 / 51	36,5	50	21	23	67
		11 – 20	35,5 / 49	34,5	48	20	22	64,5
		21 – 40	33,5 / 48	32,5	47	19	21,5	63

Приложение 2 Сталь горячекатаная, балки двутавровые по ГОСТ 8239-89

Номер балки	Размеры, мм				Линейная плотность, кг/м	Площадь сечения, см ²	Справочные данные		
	h	b	s	t			I, см ⁴	W, см ³	S, см ³
10	100	55	4,5	7,2	9,48	12	198	39,7	23,0
12	120	64	4,8	7,3	11,5	14,7	350	58,4	33,7
14	140	73	4,9	7,5	13,7	17,4	572	61,7	46,8
16	160	81	5	7,8	15,9	20,2	873	109	62,3
18	180	90	5,1	8,1	18,4	23,4	1 290	143	81,4
20	200	100	5,2	8,4	21	26,8	1 840	184	104
22	220	110	5,4	8,7	24	30,6	2 550	232	131
24	240	115	5,6	9,5	27,3	34,8	3 460	289	163
27	270	125	6	9,8	31,5	40,2	5 010	371	210
30	300	135	6,5	10,2	36,5	46,5	7 080	472	268
33	330	140	7	11,2	42,2	53,8	9 840	597	339
36	360	145	7,5	12,3	48,6	61,9	13 380	743	423
40	400	155	8,3	13	57	72,6	19 062	953	545
45	450	160	9	14,2	66,5	84,7	27 696	1 231	708
50	500	170	10	15,2	78,5	100	39 727	1 589	919
55	550	180	11	16,5	92,6	118	55 962	2 035	1 181
60	600	190	12	17,8	108	138	78 806	2 560	1 491

Примечания: h – высота балки; b – ширина балки (полки); s – толщина стенки; t – толщина полки.

РАСЧЁТ СТАЛЬНЫХ БАЛОК

Методические указания
к лабораторным занятиям по дисциплине
“Строительные конструкции и механизация строительства”
Для студентов специальности 270800«Строительство»
Профиль: «Водоснабжение и водоотведение»

Составитель: Фабричная К.А.
Редактор _____

Редакционно-издательский отдел
Казанского государственного архитектурно-строительного университета
Лицензия _____

Подписано к печати « » 2014 г.
Объем п.л.

Формат 60x84/16
Заказ № _____

Печать RISO
Тираж 100 экз.