

УДК 624.042:621.315.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ГОРОДА  
ПЕНЗА**

*Евсеев Александр Евгеньевич,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».*

*Евсеев Илья Александрович,*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
г. Пенза,*

*студент.*

**Аннотация**

В статье описан порядок расчета железобетонных опор линий электропередач на примере существующей в настоящий момент электросети города Пенза. Особое внимание отведено процедуре сбора нагрузок от климатических воздействий. Проведен анализ несущей способности и сделаны выводы о возможности эксплуатации опор с различными вариантами размещения проводов.

**Ключевые слова:** железобетонные опоры линий электропередач, линии передачи данных, нагрузки, расчет прочности.

**STUDY OF BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE  
PRISMATIC SUPPORTS OF POWER TRANSMISSION LINES OF THE  
CITY OF PENZA**

*Evseev Alexander Evgenievich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Mechanics”.*

*Evseev Ilya Alexandrovich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*student.*

## Abstract

The article describes the procedure for calculating reinforced concrete supports for power transmission lines using the example of the current power grid of the city of Penza. Particular attention is paid to the procedure for assembly loads from climatic impacts. An analysis of the capabilities is carried out and conclusions are drawn about the options for placing wires.

**Keywords:** reinforced concrete poles for power lines, data lines, loads, strength calculation.

До недавнего времени опор линий электропередач внутри городской черты использовались лишь для установки на них приборов уличного освещения, а также повеса токопроводов передачи и распределения электроэнергии. В настоящий момент, в связи с развитием сетей передачи данных, возникает необходимость в прокладке волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) предназначенных для передачи информации в оптическом диапазоне. При этом каждая организация, предоставляющая услуги широкополосного доступа к сети Интернет, должна прокладывать свою ВОЛС к пользователю. Для установки на опорах линий электропередач дополнительных проводов необходимо получить одобрение организации-собственника опор – «Пензенской горэлектросети». Поскольку провода и оборудование ВОЛС являются добавленной нагрузкой возникли опасения за несущую способность опор линий электропередач. По этой причине представители названной организации обратились в Пензенский государственный университет архитектуры и строительства с просьбой оценить несущую способность нескольких опор, наиболее характерных с точки зрения подвеса на них проводов.

Целью проведения исследования являлось составление выводов о состоянии промежуточных опор линий электропередач по улицам Гастелло и Тульской города Пенза и возможности их дальнейшей безопасной

эксплуатации. Исследование было выполнено в соответствии с действующей нормативной и справочной литературой.

Фотографии опор, количество и тип проводов, закрепленных на них, приведены на рис. 1.



Рисунок 1 - Опоры линий электропередач

Приведенный расчет был выполнен для – г. Пенза. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», г. Пенза относится к III снеговому району с нормативным значением снеговой нагрузки  $s_g = 150 \text{ кг/м}^2 = 1.5 \text{ кПа}$ , к III гололедному району с толщиной стенки гололеда  $b = 10 \text{ мм}$  и к II ветровому району с нормативным значением ветрового давления  $w_0 = 30 \text{ кг/м}^2 = 0.3 \text{ кПа}$ .

Расчет опор проведен для нормальных режимов работы при необорванных проводах и отсутствии воздействий, возникающих при

сейсмических явлениях, температурных перепадах и токах короткого замыкания. В соответствии с указаниями п. 2.4.4 «Правил устройства электроустановок. Издание 7 (ПУЭ-7)» механический расчет ВЛ до 1 кВ в аварийном режиме не производится.

#### Определение расчетных нагрузок на опоры ВЛ

По заданию на проектирование массы проводов, размещенных на опорах и их диаметры:

- провод СИП 2А 4Х70 (Ø30 мм) – 1 км провода 983 кг;
- провод СИП 2А 4Х25 (Ø21 мм)– 1 км провода 389 кг;
- провод СИП 4 2Х16 (Ø15 мм)– 1 км провода 139 кг;
- волоконно-оптический кабель ОКСН-16 (Ø8 мм) – 1 км провода 200 кг;
- волоконно-оптический кабель ОКСН-8 (Ø6 мм)– 1 км провода 125 кг;
- провод А-70 (Ø10,7 мм)– 1 км провода 189 кг;
- провод А-25 (Ø6,4 мм)– 1 км провода 68 кг;
- радиопровод ПСО-3 (Ø3 мм)– 1 км провода 57 кг.

Промежуточная опора СВ95-2с принята по проекту Арх.№ ЛЭП98.08 «Одноцепные железобетонные опоры ВЛ 0,4 кВ с самонесущими изолированными проводами» разработанному АО РОСЭП по заданию РАО «ЕЭС». Опалубочный чертеж и схема армирования опоры показаны на рис. 2. Погонная нормативная нагрузка от собственного веса при общей массе стойки 900 кг и длине 9,5 м равна  $g_n = 9.0/9.5 = 0.95$  кН/м, погонная расчетная нагрузка —  $g_p = g_n \cdot \gamma_f = 9.0 / 9.5 \cdot 1.1 = 1.04$  кН/м.

Габаритный пролет по заданию на проектирование принят равным  $l_r = 30$  м. При проектировании промежуточных опор и фундаментов, не привязанных к конкретным условиям их установки (типовых, унифицированных и т.п.), длину весового пролета рекомендуется принимать равной 1,25 длины габаритного пролета  $l_{вес} = 1,25 \cdot 30 = 37.5$  м, длину ветрового пролета рекомендуется принимать равной длине габаритного пролета  $l_{вет} = 30$  м.

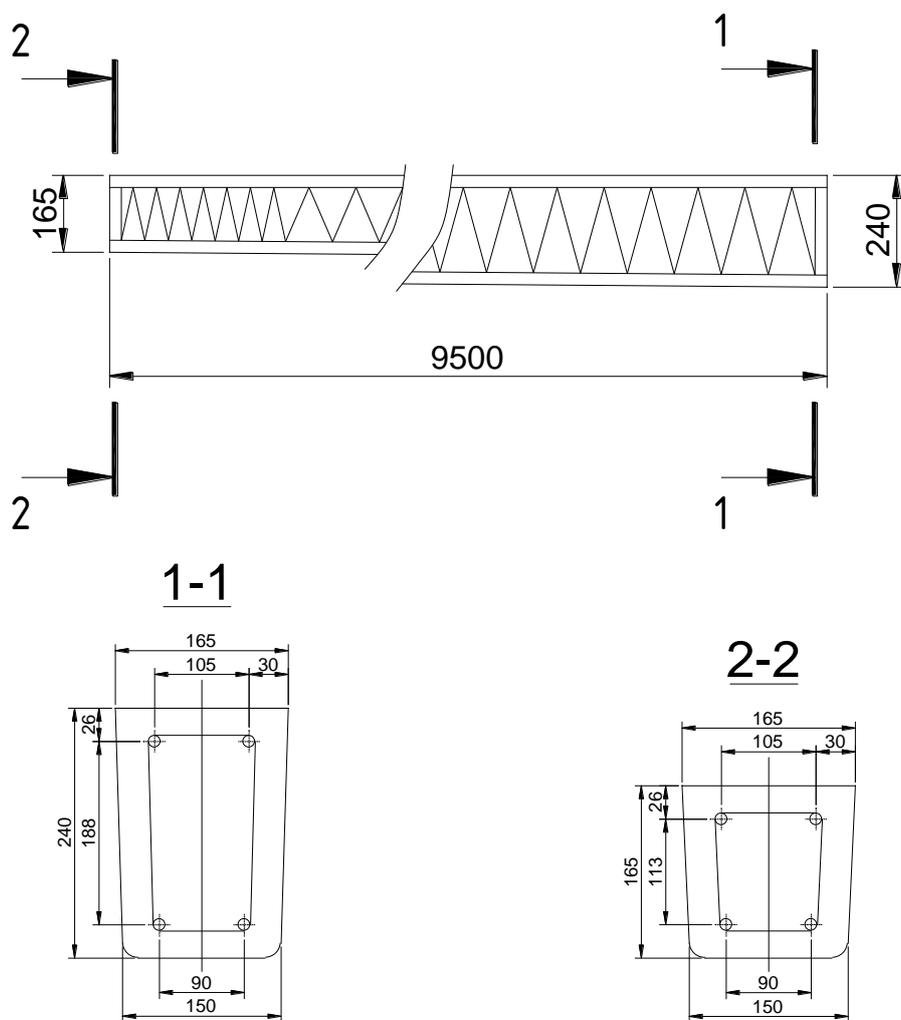


Рисунок 2 - Опалубочный чертеж и схема армирования опоры

Климатические нагрузки (все ссылки на пункты норм проектирования и обозначения, приведенные ниже даны в соответствии с главой 2.5 СО 153-34.20.120-2003. «ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Издание 7»):

- (п. 2.4.11.) Климатические условия для расчета ВЛ до 1 кВ в нормальном режиме должны приниматься как для ВЛ до 20 кВ в соответствии с 2.5.38 - 2.5.74. При этом для ВЛ до 1 кВ следует принимать:

при расчете по 2.5.52:  $C_x = 1,1$  - для СИП, свободных или покрытых гололедом;

при расчете по 2.5.54 и 2.5.55

$\gamma_{nw} = 1,0$  и  $\gamma_{nr} = 1,2$  - при подвеске на опорах ВЛ самонесущего неметаллического оптического кабеля (ОКСН);

$\gamma_p = 1,0$  и  $K_1 = 1,0$  - во всех случаях.

- (п. 2.5.41.) Нормативное ветровое давление  $W_0$ , соответствующее 10-минутному интервалу осреднения скорости ветра ( $v_0$ ), на высоте 10 м над поверхностью земли принимается по табл. 2.5.1 в соответствии с картой районирования территории России по ветровому давлению и для II-ого ветрового района составит  $W_0 = 500$  Па;

- (п. 2.5.43.) Нормативное ветровое давление при гололеде  $W_{\Gamma}$  с повторяемостью 1 раз в 25 лет, при отсутствии региональных карт и данных наблюдений, определяется по формуле  $W_{\Gamma} = 0,25W_0 = 0.25 \cdot 500 = 125$  Па. Однако для ВЛ до 20 кВ нормативное ветровое давление при гололеде должно приниматься не менее 200 Па;

- (п. 2.5.46.) Нормативную толщину стенки гололеда  $b_0$  плотностью  $0,9 \text{ г/см}^3$  следует принимать по табл. 2.5.3 в соответствии с картой районирования территории России по толщине стенки гололеда (для III-ого гололедного района она составит  $b_0=20$  мм);

- (п. 2.5.51.) Температуры воздуха определяются по строительным нормам и правилам и по данным наблюдений с округлением до значений, кратных пяти. В соответствии со СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*» среднегодовая температура  $+5,1(5)^{\circ}\text{C}$ , низшая  $-43(-45)^{\circ}\text{C}$ , высшая  $+40(+40)^{\circ}\text{C}$ . Температуру воздуха при нормативном ветровом давлении  $W_0$  следует принимать равной минус  $5^{\circ}\text{C}$ ;

- (п. 2.5.52.) Нормативная ветровая нагрузка на провода  $P_w^H$ , действующая перпендикулярно проводу, для каждого рассчитываемого условия определяется по формуле

$$P_w^H = \alpha_w \cdot K_1 \cdot K_w \cdot C_x \cdot W \cdot F \cdot \sin^2 \varphi$$

где  $\alpha_w$  - коэффициент, учитывающий неравномерность ветрового давления по пролету ВЛ, принимаемый равным 1,0 при ветровом давлении 200 Па и равным 0,71 при ветровом давлении 500 Па;

$K_1$  - коэффициент, учитывающий влияние длины пролета на ветровую нагрузку, равный 1,2 при длине пролета до 50 м;

$K_w$  - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте в зависимости от типа местности, для высоты до 15 м и типа местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой не менее 2 / 3 высоты опор) принимается равным 0,65;

$C_x$  - коэффициент лобового сопротивления, принимаемый равным: 1,1 - для проводов и тросов, свободных от гололеда, диаметром 20 мм и более; 1,2 - для всех проводов и тросов, покрытых гололедом, и для всех проводов и тросов, свободных от гололеда, диаметром менее 20 мм;

$W$  - нормативное ветровое давление в рассматриваемом режиме.

Площадь продольного диаметрального сечения провода (троса)  $F$  определяется по формуле

$$F = (d + 2 \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_y) \cdot l$$

где  $d$  - диаметр провода;

$K_i$  и  $K_d$  - коэффициенты, учитывающие изменение толщины стенки гололеда по высоте и в зависимости от диаметра провода (до высоты 25 метров  $K_i = 1,0$ , при толщине провода 10 мм  $K_d = 1,0$  при толщине провода 20 мм  $K_d = 0,9$ , при толщине провода 30 мм  $K_d = 0,8$ );

$b_y$  - условная толщина стенки гололеда, принимается при отсутствии региональных карт и данных наблюдений  $b_y = b_3 = 20$  мм;

$l$  - длина ветрового пролета (30 м);

Расчеты нормативной ветровой нагрузки на провода для рассматриваемой номенклатуры проводов сведены в таблицу 1.

- (п. 2.5.53.) Нормативная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода определяется по формуле

$$P_r^H = \pi \cdot K_i \cdot K_d \cdot b_3 \cdot (d + K_i \cdot K_d \cdot b_3) \cdot \rho \cdot g$$

где  $\rho$  - плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см<sup>3</sup>;

$g$  - ускорение свободного падения, принимаемое равным 9,8 м/с<sup>2</sup>.

Таблица 1. Нормативная ветровая нагрузка на провода

Тип провода	Диаметр, мм	$K_d$	$F, \text{ м}^2$	$P_w^H, \text{ Н}$
СИП 2А 4Х70	30	0.8	1.86	349
СИП 2А 4Х25	21	0.89	1.698	318
СИП 4 2Х16	15	0.95	1.59	298
ОКСН-16	8	1.0	1.44	270
ОКСН-8	6	1.0	1.38	259
А-70	10.7	0.993	1.5126	284
А-25	6.4	1.0	1.392	261
ПСО-3	3	1.0	1.29	242

Для всех проводов принято:  $W=W_T=200 \text{ Па}$ ,  $\alpha_w=1.0$ ,  $K_i=1.0$ ,  $K_w=0.65$ ,  $C_x=1.2$ ,  $K_f=1.0$ ,  $b_y=20 \text{ мм}$ ,  $l_{\text{вет}}=30 \text{ м}$

2.5.55. Расчетная линейная гололедная нагрузка на 1 м провода  $P_{г.л}$  при механическом расчете проводов и тросов по методу допускаемых напряжений определяется по формуле

$$P_{г.л} = P_{г}^H \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f \cdot \gamma_d$$

где  $\gamma_f$  - коэффициент надежности по гололедной нагрузке, равный 1,6 - для районов по гололеду III и выше;

$\gamma_d$  - коэффициент условий работы, равный 0,5.

Расчеты линейной гололедной нагрузки на 1 м провода для рассматриваемой номенклатуры проводов сведены в таблицу 2.

- (п. 2.5.58.) Нормативная ветровая нагрузка на конструкцию опоры определяется как сумма средней и пульсационной составляющих.

- (п. 2.5.59.) Нормативная средняя составляющая ветровой нагрузки на опору  $Q_{нс}$  определяется по формуле

$$Q_c^H = K_w \cdot W \cdot C_x \cdot A = 0.65 \cdot 200 \cdot 2.1 \cdot 0.24 = 66 \text{ Н / м.}$$

Таблица 2. Линейная гололедная нагрузка на 1 м провода

Тип провода	Диаметр, мм	$K_d$	$P_{г}^H$ , Н/м	$P_{г.л.}$ , Н/м
СИП 2А 4Х70	30	0.8	21	17
СИП 2А 4Х25	21	0.89	20	16
СИП 4 2Х16	15	0.95	18	15
ОКСН-16	8	1.0	16	13
ОКСН-8	6	1.0	15	12
А-70	10.7	0.993	17	14
А-25	6.4	1.0	15	12
ПСО-3	3	1.0	13	11
Для всех проводов принято: $K_i=1.0$ , $b_3=20$ мм, $\rho=0,9$ г/см <sup>3</sup> , $g=9,8$ м/с <sup>2</sup>				

где  $C_x$  -аэродинамический коэффициент, определяемый в зависимости от вида конструкции, согласно строительным нормам и правилам (по приложению В.1.13 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»  $C_x = 2,1$ );

$A$  - площадь проекции, ограниченная контуром конструкции, ее части или элемента с наветренной стороны на плоскость перпендикулярно ветровому потоку, вычисленная по наружному габариту (максимальная ширина опоры 240 мм принята в запас несущей способности).

- (п. 2.5.60.) Нормативная пульсационная составляющая ветровой нагрузки  $Q_{п}^H$  для опор высотой до 50 м принимается для свободностоящих одностоечных железобетонных опор ВЛ до 35 кВ

$$Q_{п}^H = 0,8 Q_c^H = 0,8 \cdot 66 = 53 \text{ Н/м.}$$

- (п. 2.5.62.) Расчетная ветровая нагрузка на провода, воспринимаемая опорами  $P_{w0}$ , определяется по формуле

$$P_{w0} = P_w^H \cdot \gamma_{nw} \cdot \gamma_p \cdot \gamma_f$$

где  $\gamma_f$  - коэффициент надежности по ветровой нагрузке, равный для проводов (тросов), покрытых гололедом и свободных от гололеда:

1,3 - при расчете по первой группе предельных состояний;

1,1 - при расчете по второй группе предельных состояний.

Расчеты ветровой нагрузки на провода, воспринимаемой опорами, для рассматриваемой номенклатуры проводов сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Ветровая нагрузка на провода

Тип провода	Диаметр, мм	$P_w^H$ , Н	$P_w^{p1}$ , Н	$P_w^{p2}$ , Н
СИП 2А 4Х70	30	349	454	384
СИП 2А 4Х25	21	318	414	350
СИП 4 2Х16	15	298	388	328
ОКСН-16	8	270	351	297
ОКСН-8	6	259	337	285
А-70	10.7	284	370	313
А-25	6.4	261	340	288
ПСО-3	3	242	315	267

- (п. 2.5.63.) Расчетная ветровая нагрузка на конструкцию опоры  $Q$  определяется по формуле

$$Q = (Q_c^H + Q_{II}^H) \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f = (66 + 53) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.3 = 155 \text{ Н/м (по I группе);}$$

$$Q = (Q_c^H + Q_{II}^H) \gamma_{nw} \gamma_p \gamma_f = (66 + 53) \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.1 = 131 \text{ Н/м (по II группе);}$$

где  $\gamma_f$  - коэффициент надежности по ветровой нагрузке, равный:

1,3 - при расчете по первой группе предельных состояний;

1,1 - при расчете по второй группе предельных состояний.

- (п. 2.5.66.) Гололедная нагрузка от проводов и тросов, приложенная к точкам их крепления на опорах, определяется умножением соответствующей линейной гололедной нагрузки на длину весового пролета.

Расчеты гололедной нагрузки, приложенной к точкам крепления проводов на опорах для рассматриваемой номенклатуры проводов сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Гололедная нагрузка, приложенная к точкам крепления на опорах

Тип провода	Диаметр, мм	$F_{Г}^H$ , Н	$F_{Г.лб}$ , Н
СИП 2А 4Х70	30	787.5	637.5
СИП 2А 4Х25	21	750	600
СИП 4 2Х16	15	675	562.5
ОКСН-16	8	600	487.5
ОКСН-8	6	562.5	450
А-70	10.7	637.5	525
А-25	6.4	562.5	450
ПСО-3	3	487.5	412.5
Для всех проводов принято: $l_{всc}=37,5$ м			

- (п. 2.5.69.) Расчетная нагрузка на опоры ВЛ от веса проводов конструкций опор по первой и второй группам предельных состояний определяется при расчетах как произведение нормативной нагрузки на коэффициент надежности по весовой нагрузке  $\gamma_f$ , принимаемый равным для проводов 1,05, для конструкций железобетонных опор – 1,1.

Расчеты нагрузки на опоры ВЛ от веса проводов для рассматриваемой номенклатуры проводов сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Нагрузка от веса проводов, приложенная к точкам крепления на опорах

Тип провода	Диаметр, мм	$F_{П}^P$ , Н
СИП 2А 4Х70	30	388
СИП 2А 4Х25	21	154
СИП 4 2Х16	15	55
ОКСН-16	8	79
ОКСН-8	6	50
А-70	10.7	75

Тип провода	Диаметр, мм	$F_{II}^P$ , Н
А-25	6.4	27
ПСО-3	3	23
Для всех проводов принято: $l_{вес}=37,5$ м		

### Расчет несущей способности опоры

В соответствии с п. 2.4.53 ПЭУ-7 опоры ВЛ должны рассчитываться по первому и второму предельному состоянию в нормальном режиме работы ВЛ на климатические условия. Промежуточные опоры должны быть рассчитаны на следующие сочетания нагрузок:

- I. одновременное воздействие поперечной ветровой нагрузки на провода, свободные или покрытые гололедом, и на конструкцию опоры, а также нагрузки от тяжения проводов ответвлений к вводам, свободных от гололеда или частично покрытых гололедом;
- II. на нагрузку от тяжения проводов ответвлений к вводам, покрытых гололедом, при этом допускается учет отклонения опоры под действием нагрузки;
- III. на условную расчетную нагрузку, равную 1,5 кН, приложенную к вершине опоры и направленную вдоль оси ВЛ.

Проверка прочности опоры ВЛ проведена с использованием программы «АРБАТ» в.21.1.1.1, входящей в состав программного комплекса «SCAD Soft++». Программа АРБАТ предназначена для проверки несущей способности или подбора арматуры в элементах бетонных и железобетонных конструкций, для вычисления прогибов в железобетонных балках, для проверки местной прочности элементов железобетонных конструкций (включая закладные детали) согласно требованиям СП 63.13330.2012.

Расчет выполняется с учетом предельных состояний первой и второй группы (прочность и трещиностойкость) для расчетных сочетаний усилий (PCY), выбираемых автоматически в зависимости от заданных расчетных

нагрузок в соответствии с требованиями СП 20.13330.2011 "Нагрузки и воздействия" и СП 63.13330.2012 "Бетонные и железобетонные конструкции",

По результатам расчета были сделаны следующие выводы:

1. Стойка СВ95-2с не удовлетворяет требованиям СП по предельной гибкости.
2. Промежуточная опора, расположенная по ул. Гастелло и несущая три провода СИП и три провода ОКСН, загружена на 89,8 % своей несущей способности. Установка дополнительных проводов на этой опоре приведет к её перегрузке, т.е. к возможному отказу.
3. Промежуточная опора, расположенная по ул. Тульская-Будашкина и несущая десять проводов А и три провода ОКСН, перегружена на 41,4 % своей несущей способности. Для обеспечения прочности и надежной работы опоры под нагрузкой рекомендуется снизить нагрузку на опору, что может быть достигнуто путем уменьшения количества проводов.

#### **Библиографический список:**

1. СО 153-34.20.120-2003. «ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Издание 7».
2. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85 \* – М.: ОАО ЦПП, 2011.
3. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003– М.: Минстрой России, 2015.