

УДК 629.4.087

## Исследование температурных диапазонов эксплуатации подвижного состава в контексте оценки возможности образования влаги в пневматической сети

С. В. Шведун, Д. К. Александров, Е. Н. Тресцова

ООО «ВСМ-Сервис», Обособленное подразделение ОП Лиговское, Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, Лиговский пр., 254, лит. В

**Для цитирования:** Шведун С. В., Александров Д. К., Тресцова Е. Н. Исследование температурных диапазонов эксплуатации подвижного состава в контексте оценки возможности образования влаги в пневматической сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 351–361. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-351-361

### Аннотация

**Цель:** Исследовать закономерности процесса конденсации влажного атмосферного воздуха в замкнутом объеме пневматических устройств и соединительной арматуры железнодорожного подвижного состава после его сжатия в компрессорной установке. Провести анализ соотношения температуры наружного воздуха, пневматической сети и температуры точки росы в основных диапазонах эксплуатации подвижного состава. Дать оценку степени образования влаги внутри арматуры трубопроводов пневматической тормозной сети железнодорожного подвижного состава в исследованных температурных диапазонах. **Методы:** Алгоритм исследования процессов конденсации влаги в пневматической сети железнодорожного подвижного состава; сравнение расчетных значений точки росы и температуры поверхности узлов пневматической сети тягового подвижного состава для рабочего диапазона наружных температур в зависимости от относительной влажности атмосферного воздуха. **Результаты:** Теоретически исследован механизм образования влаги на внутренней поверхности главных резервуаров и соединительной арматуры в зависимости от изменения метеорологических условий, оценено ее возможное негативное влияние на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава. С применением теоретических основ термодинамики и теплопередачи проведены расчеты и составлена диаграмма соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети. С использованием составленной диаграммы произведено зонирование температурных рядов атмосферного воздуха и внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, определены границы температурных зон и уровня относительной влажности воздуха, при которых образование влаги не может негативно повлиять на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава. **Практическая значимость:** Произведена адаптация исследованных закономерностей для подбора и тестирования параметров устройств подготовки сжатого воздуха по требуемой относительной влажности воздуха и температуре точки росы. Визуальное представление полученных данных также позволит повысить качество испытания осушительных установок, прошедших текущий и капитальный ремонт, за счет сопоставления уровня точки росы и текущих атмосферных и метеорологических параметров региона эксплуатации.

**Ключевые слова:** Установка осушения сжатого воздуха, компрессорная установка, температура точки росы, парциальное давление пара, относительная влажность воздуха, термодинамика и теплопередача.

В настоящий момент основным приоритетом в экономической политике Российской Федерации является развитие внутреннего машиностроительного, агропромышленного и высокотехнологического производства на основе имеющихся на территории государства сырьевых и природных запасов.

При этом синхронизация деятельности производственных отраслей и тем самым поэтапное повышение эффективности каждого из направлений отечественной экономики не может быть в полной мере реализовано без развития транспортной инфраструктуры, включающей в себя также железнодорожную сеть общей протяженностью более 85 тыс. км, находящейся на третьем месте в мире среди стран — ведущих экономик мира.

Таким образом, чтобы соответствовать мировым темпам развития экономики, к железнодорожной инфраструктуре государства должны предъявляться особые требования, направленные на организацию бесперебойной работы по доставке грузов и пассажиров [1].

Помимо требований к надежности приводного оборудования тягового подвижного состава особое внимание должно быть уделено обеспечению эффективности применяемых тормозных систем, основным рабочим телом которых является сжатый атмосферный воздух [2].

На основании опыта эксплуатации тягового железнодорожного подвижного состава основными техногенными проблемами обеспечения работоспособного состояния пневматических тормозных систем железнодорожного подвижного состава и обеспечения безопасности железнодорожных перевозок являются:

- 1) низкая плотность пневматической сети;
- 2) недостаточная производительность устройств подготовки сжатого воздуха;
- 3) внутренняя коррозия пневматических устройств;

4) образование заторов внутри пневматической тормозной сети подвижного состава, вызванной замерзанием сконденсированной влаги в период отрицательных температур.

Таким образом, большинство случаев отказа тормозного оборудования подвижного состава будут связаны со снижением эффективности работы сжатого воздуха пневматической системы из-за его утечек в атмосферу вследствие внутренней коррозии и износа мест соединения от циклов температурного расширения-сжатия по причине повышенного содержания влаги в объеме сжатого воздуха.

Для минимизации возможных случаев нарушения работоспособного состояния тормозной системы подвижного состава вследствие коррозии и замерзания необходимо снизить содержание водяного пара в объеме сжатого воздуха и вероятность его конденсации внутри пневматических устройств.

Атмосферный воздух всегда содержит водяной пар. После преодоления предела насыщения (при 100%-ой влажности воздуха) вода выпадает в виде капель, тумана или снега. По мере повышения температуры способность воздуха поглощать влагу возрастает. При сжатии воздуха в компрессорной установке перед его подачей в пневматическую систему происходит его нагрев, тем самым содержание влаги в сжимаемом воздухе повышается, так как увеличивается предел насыщения.

Изменение количественного содержания влаги в сжимаемом воздухе можно представить на конкретном примере с применением сведений из области термодинамики и теплопередачи. Так, при относительной влажности воздуха 80 % и температуре воздуха 30 °С фактическое содержание в нем влаги будет определяться по формуле (1):

$$d_{\text{р.атм}} = \varphi \cdot d_{\text{равн}}, \quad (1)$$

где  $d_{p.атм}$  — фактическое влагосодержание атмосферного воздуха;

$d_{равн}$  — равновесное (максимальное) влагосодержание воздуха при относительной влажности воздуха 100 % и температуре окружающего воздуха 30 °С (303,15 К),  $d_{равн} = 30 \text{ г/м}^3$ ;

$\phi$  — относительная влажность воздуха, %

$$d_{p.атм} = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ г/м}^3.$$

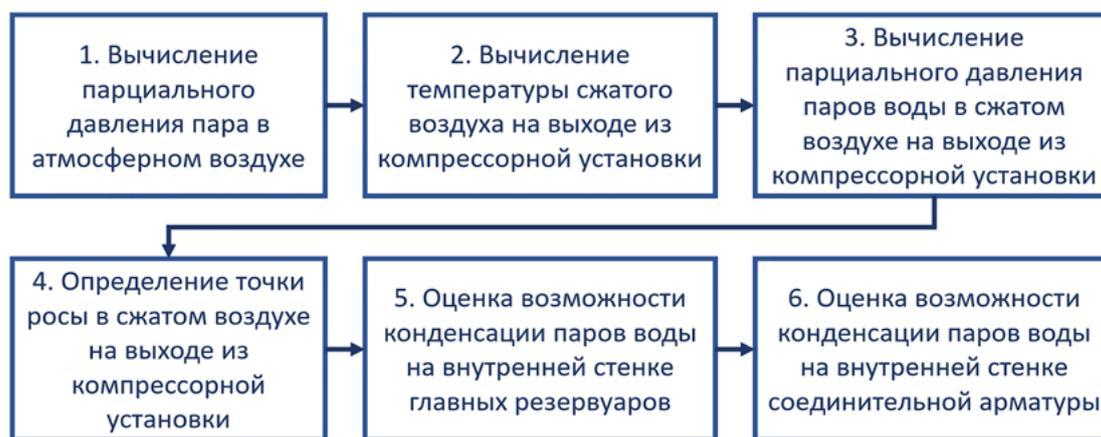
Таким образом, при изначально заданных атмосферных параметрах атмосферный воздух объемом 1 м<sup>3</sup>, сжатый в компрессорной установке до избыточного давления 8 кгс/см<sup>2</sup>, будет содержать в 8 раз больше влаги, а именно — 192 г. Способность сжатого воздуха вместить такое количество влаги во взвешенном состоянии также будет обусловлена его значительным разогревом — свыше 100 °С (373,15 К).

Далее на выходе компрессорной установки сжатый воздух будет подвержен процессу перехода к тепловому равновесию с окружающим соединительную арматуру пневматической сети подвижного состава атмосферным воздухом [3]. По факту проведенных эмпирических исследований на примере компрессорных установок электропоездов серии ЭС2Г «Ласточка» температура сжатого

воздуха в арматуре на выходе из компрессорной установки (штатно оборудованной радиатором-охладителем) составит 50–60 °С (323,15–333,15 К) [4]. В таком состоянии насыщенный сжатый воздух (при его 100%-ой относительной влажности) может содержать только 83 г/м<sup>3</sup> водяного пара, в результате чего внутри пневматической арматуры выпадет  $192 - 83 = 109 \text{ г/м}^3$  жидкой воды. Дальнейшее охлаждение сжатого воздуха до температуры окружающей среды приведет к дополнительной конденсации влаги с многократно возрастающим риском коррозии и замерзания [5].

Таким образом, при достижении сжатым воздухом объемом 1 м<sup>3</sup> с избыточным давлением 8 кгс/см<sup>2</sup> (0,785 МПа) к моменту достижения теплового равновесия с окружающей средой (30 °С, или 303,15 К) в виде жидкой воды в соединительной арматуре пневматической сети подвижного состава будет сконденсировано 162 г жидкой влаги.

Для более детального описания процесса конденсации влаги в пневматической сети подвижного состава с точки зрения термодинамических параметров исследована термодинамическая модель сжатия атмосферного воздуха со следующими исходными параметрами:



**Рис. 1.** Алгоритм исследования процессов конденсации влаги в пневматической сети железнодорожного подвижного состава

– температура атмосферного воздуха  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (303,15 K);

– относительная влажность атмосферного воздуха  $\varphi = 80 \%$ ;

– давление сжатого воздуха после компрессора  $P_k = 0,785 \text{ МПа}$ .

Последовательность теоретических расчетов представлена в виде схемы, приведенной на рис. 1.

Перед описанием теоретических расчетов необходимо отметить, что значения температур приведены как в системе СИ, в Кельвинах, так и в градусах по шкале Цельсия, что обусловлено большей практической применимостью шкалы Цельсия в государственных отраслевых стандартах, а именно в ГОСТ 32202—2013 «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава и систем испытаний пневматического оборудования железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству и методы контроля» [6].

### 1. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе

Парциальное давление пара в атмосферном воздухе определяется по формуле (2):

$$P_{\text{п}} = P_{\text{а,н}} \cdot \varphi, \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  — парциальное давление пара в атмосферном воздухе, кгс/см<sup>2</sup>;

$P_{\text{а,н}}$  — парциальное давление насыщенного пара при температуре наружного воздуха  $t_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (303,15 K);

Относительная влажность воздуха  $\varphi = 80 \%$ .

В соответствии с данными таблиц насыщенного пара парциальное давление насыщенного пара, соответствующее температуре  $t_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (303,15 K), равно  $P_{\text{а,н}} = 4243 \text{ Па}$  [7].

Тогда парциальное давление пара в атмосферном воздухе при температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  (303,15 K) и относительной влажности  $80 \%$  составит:

$$P_{\text{п,1}} = 4243 \cdot 0,8 = 3393,101 \text{ Па}.$$

С учетом допущения, что непосредственно перед поступлением воздуха в компрессорный агрегат его температура увеличивается в среднем на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , что обусловлено теплообменом между газом и нагретым корпусом компрессорной установки, атмосферный воздух на впускном трубопроводе компрессорного агрегата будет обладать следующими параметрами:

– температура наружного воздуха перед поступлением в компрессор —  $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  (313,15 K);

– относительная влажность воздуха  $\varphi = 80 \%$ ;

– парциальное давление пара в воздухе  $P_{\text{п,1}} = 3393,101 \text{ Па}$ .

### 2. Определение температуры сжатого воздуха на выходе из компрессорной установки

Так как в компрессорной установке происходит адиабатический процесс изменения состояния сжатого воздуха, обусловленного сжатием, нагреванием (вследствие сжатия и трения) и последующим охлаждением в соединительной арматуре, то соотношение между температурами и давлениями будет описываться по формуле (3) [8]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (3)$$

где  $T_1$  — температура атмосферного воздуха на входе в компрессор, K;

$T_2$  — температура сжатого воздуха на выходе из компрессора, K;

$P_1$  — давление атмосферного воздуха на входе в компрессор, МПа ( $P_1 = 0,098 \text{ МПа}$ );

$P_2$  — давление сжатого воздуха на выходе из компрессора, МПа ( $P_2 = 0,785 \text{ МПа}$ );

$n$  — показатель политропного процесса, для достижения целей исследования значе-

ние коэффициента  $n = 1,2$ , соответствующее незначительному колебанию температуры воздуха непосредственно внутри компрессорной установки.

Тогда температура сжатого воздуха на выходе из компрессорной установки будет определяться по выражению:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 313,15 \left( \frac{0,785}{0,098} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 442,6 \text{ К} = 169,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

### 3. Определение давления паров воды и температуры точки росы в сжатом воздухе на выходе из компрессорной установки

Для целей исследования принято допущение, что давление паров воды в сжатом воздухе после компрессора пропорционально степени сжатия  $\varepsilon = 8$  [9]. Тогда парциальное давление пара в сжатом воздухе определяется по формуле (4):

$$P_{r,2} = P_{r,1} \varepsilon = 3393,101 \cdot 8 = 27\,144,808 \text{ Па}. \quad (4)$$

### 4. Определение точки росы в сжатом воздухе на выходе из компрессорной установки

В соответствии с данными таблиц насыщенного пара, температура точки росы, соответствующая парциальному давлению насыщенного пара,  $P_{p,2} = 27\,144,808 \text{ Па}$ , составляет  $t_{p,2} = 67 \text{ }^\circ\text{C}$  (340,15 К) [7].

Таким образом, при температуре сжатого воздуха  $t_2 = 169,6 \text{ }^\circ\text{C}$  (442,6 К) и температуре точки росы  $t_{p,2} = 67 \text{ }^\circ\text{C}$  (340,15 К) конденсация паров влаги из усредненного объема сжатого воздуха происходить не будет.

При этом если в процессе движения подвижного состава температура арматуры и напорных

резервуаров вследствие обдува потоками набегающего атмосферного воздуха будет ниже температуры точки росы, то на внутренних стенках герметичного объема может происходить конденсация влаги.

### 5. Оценка возможности конденсации паров воды на внутренней стенке главных резервуаров

Согласно применяемой в исследовании методике, температура внутренней стенки главных резервуаров определяется по формуле (5):

$$t_{\text{пов,гр}} = t_a + \frac{\alpha_{\text{вн,гр}}}{\alpha_{\text{вн,гр}} + \alpha_{\text{нар,гр}}} (t_{\text{сж}} - t_a), \quad (5)$$

где  $t_{\text{пов,гр}}$  — температура стенки главного резервуара, К;

$t_a$  — температура атмосферного воздуха, К;

$t_{\text{сж}}$  — температура сжатого воздуха, К;

$\alpha_{\text{вн,гр}}$  — коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки главного резервуара к сжатому воздуху;

$\alpha_{\text{нар,гр}}$  — коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной стенки главного резервуара к атмосферному воздуху.

Так как коэффициент конвективной теплоотдачи представляет собой сложную функцию от большого числа параметров, которую невозможно представить в виде справочных табличных значений, то для расчета приближенных значений коэффициент в практических целях применяется закон Ньютона — Рихмана, предполагающий постоянство коэффициента  $\alpha$  по поверхности теплообмена [10].

Для достижения целей исследования коэффициентам  $\alpha_{\text{вн,гр}}$  и  $\alpha_{\text{нар,гр}}$ , имеющим прямую зависимость от скорости движения воздуха, ориентировочно заданы следующие значения:

$$\alpha_{\text{вн,гр}} = 1000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с});$$

$$\alpha_{\text{нар,гр}} = 5000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}).$$

Тогда

$$t_{\text{пов,гр}} = 303,15 + \frac{1000}{1000 + 5000} (442,6 - 303,15) = 326,42 \text{ К} = 53,3 \text{ }^\circ\text{С}.$$

#### **6. Оценка возможности конденсации паров воды на внутренней стенке соединительной арматуры**

Температура внутренней стенки соединительной арматуры также определяется по формуле (4), при этом используется скорректированный коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки пневматической арматуры к сжатому воздуху  $\alpha_{\text{вн,па}} = 800 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$ .

Тогда температура внутренней стенки соединительной арматуры определяется по выражению:

$$t_{\text{пов,са}} = 303,15 + \frac{800}{800 + 5000} (442,6 - 303,15) = 322,41 \text{ К} = 49,2 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Так как вычисленная температура внутренней стенки главного резервуара и соединительной арматуры ниже температуры точки росы сжатого воздуха, то внутри указанных емкостей будет происходить конденсация влаги.

Для объективной оценки риска повышенной конденсации влаги внутри ограниченного объема пневматической сети железнодорожного подвижного состава проведен аналогичный расчет термодинамических параметров сжатого воздуха на всем диапазоне рабочих температур тягового железнодорожного подвижного состава, характерных для Северо-Западного региона Российской Федерации: от  $-40$  до  $+30$   $^\circ\text{С}$  при средней влажности воздуха 80 % [11].

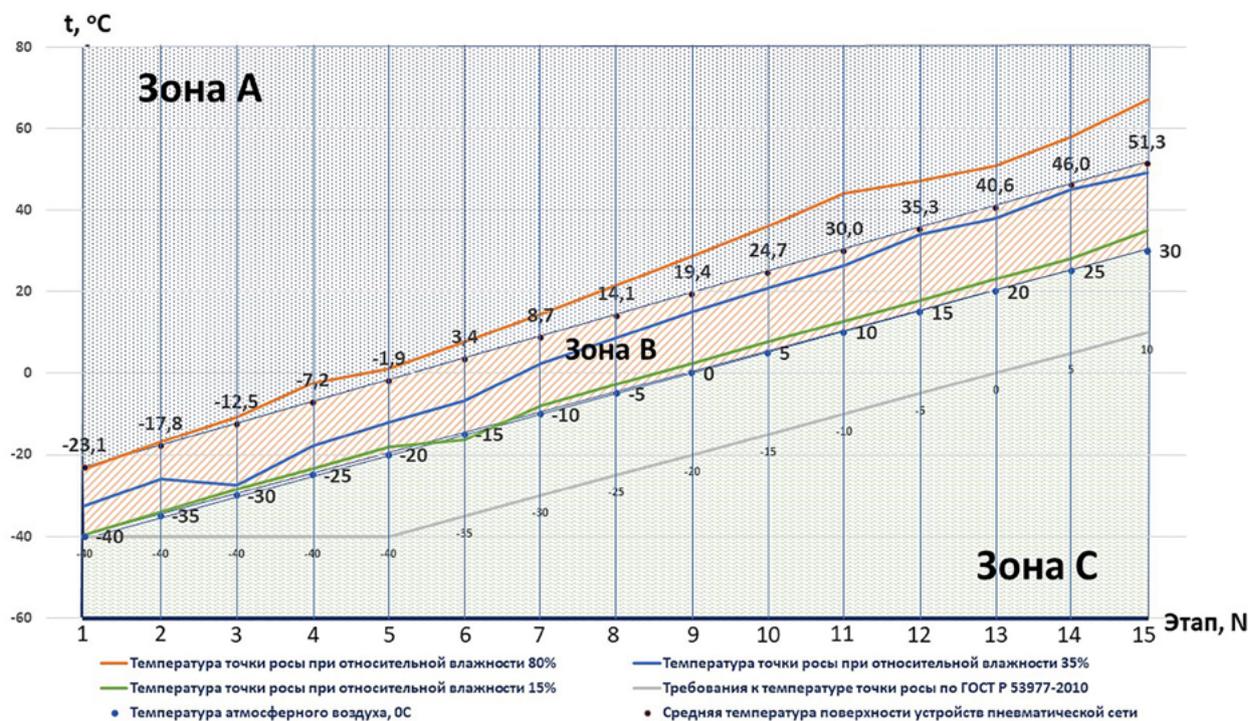
Из результатов теоретических расчетов следует, что температура поверхности главного резервуара превышает температуру точки росы только при температуре наружного воздуха в диапазоне от  $-40$  до  $-35$   $^\circ\text{С}$ . При более высо-

ких температурах внутренней поверхности главного резервуара ее значения будут находиться ниже точки росы, вследствие чего на внутренней поверхности будет образовываться влага. Температура внутренней поверхности соединительной арматуры будет находиться ниже точки росы во всем указанном диапазоне изменения температуры наружного воздуха, вследствие чего в зимнее время в трубопроводах возможна конденсация и замерзание воды, способствующее образованию ледяных пробок без принятия мер со стороны локомотивной бригады по продувке тормозной и напорной магистрали в пути следования, что в современных условиях является неприемлемым.

Убрать необходимость периодического удаления влаги из пневматической сети поезда возможно, если снизить относительную влажность воздуха в ограниченном объеме до значений менее 35 % с применением систем осушения сжатого воздуха.

Из результатов теоретических расчетов для относительной влажности 35 % следует, что образование влаги при скорректированных параметрах относительной влажности сжатого воздуха возможно только в частях соединительной арматуры пневматической сети и ее содержание будет чрезвычайно мало, так как разница температур между температурой точки росы и температурой поверхности не превышает 2,5 %.

При этом пунктом 5.3 раздела 5 ГОСТ 32202—2013 к качеству сжатого воздуха предъявляются еще более ужесточенные требования [6]. Так, температура точки росы при температуре атмосферного воздуха от  $-40$  до  $-20$   $^\circ\text{С}$  включительно должна находиться на уровне  $-40$   $^\circ\text{С}$ , а при температуре атмосферного воздуха выше  $-20$   $^\circ\text{С}$  температура точки росы должна соответствовать разности  $t_a - 20$   $^\circ\text{С}$ . В условиях реальной эксплуатации подвижного состава таких параметров можно достичь только путем дополнительного



**Рис. 2.** Соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети

глубокого охлаждения сжатого воздуха после компрессорной установки, что сильно усложнит конструкцию подвижного состава и увеличит требования к обслуживающему персоналу [12].

Для более углубленного исследования требований, предъявляемых к влажностным характеристикам сжатого воздуха, дополнительно исследованы параметры точки росы при относительной влажности сжатого воздуха 15 %.

Из результатов теоретических расчетов для относительной влажности 15 % следует, что температура узлов пневматической сети (соединительной арматуры и главных резервуаров) на всем рабочем диапазоне температур окружающего воздуха будет выше температуры точки росы — конденсации влаги происходить не будет, тем самым достигается приемлемый уровень подготовки сжатого воздуха.

Обобщенные результаты исследования соотношения температуры атмосферного воздуха,

средней температуры поверхности устройств пневматической сети, температуры точки росы при относительной влажности воздуха 15 %, 35 %, 80 %, а также требований по температуре точки росы согласно ГОСТ 32202—2013 представлены на рис. 2.

Как видно из содержания рис. 2, линиями, образующими температурный ряд атмосферного воздуха и температурный ряд внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, полученная диаграмма может быть разделена на 3 зоны:

Зона А — комплекс возможных значений температуры точки росы, при которых со 100%-ой вероятностью в пневматической сети поезда будет образовываться конденсат. Нахождение температуры точки росы в данной зоне является неприемлемым в условиях постоянной эксплуатации.

Зона В — комплекс возможных значений точки росы, находящихся между рассматрива-

емыми температурами атмосферного воздуха и расчетными значениями температуры внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, при которых крайне низкая вероятность образования конденсата в приграничной области между Зоной А и Зоной В. Такая вероятность является приемлемой с точки зрения постоянной эксплуатации подвижного состава в условиях значающих перепадов температур атмосферного воздуха, характерных для Северо-Западного, Центрального, а также ряда областей Южного региона РФ.

Зона С — комплекс возможных значений точки росы, графически расположенных ниже температуры атмосферного воздуха. Предполагает полное отсутствие конденсата в пневматической сети поезда на всем исследуемом диапазоне значений.

Таким образом, в случае, когда температурный ряд точки росы при относительной влажности 15 и 35 % находится в пределах Зоны В и Зоны С, качество подготовки сжатого воздуха будет соответствовать эксплуатационным потребностям тягового подвижного состава.

## Выводы

В рамках написания данной статьи сделаны следующие выводы:

1. Теоретически исследован механизм образования влаги на внутренней поверхности главных резервуаров и соединительной арматуры в зависимости от изменения метеорологических условий, оценено ее возможное негативное влияние на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

2. С применением теоретических основ термодинамики и теплопередачи проведены расчеты и составлена диаграмма соотношения температур атмосферного воздуха, точки росы и поверхности устройств пневматической сети.

3. С использованием составленной диаграммы произведено зонирование температур-

ных рядов атмосферного воздуха и внутренней поверхности устройств пневматической сети поезда, определены границы температурных зон и уровня относительной влажности воздуха, при которых образование влаги не может негативно повлиять на безопасность и эффективность эксплуатации подвижного состава.

## Список источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р // Консультант Плюс.

2. Крылов В. И. Автоматические тормоза подвижного состава: учебник для техникумов ж.-д. трансп. / В. И. Крылов, В. В. Крылов. — 4-е изд., перераб. и доп. Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1983 г. — М.: Альянс, 2014. — 360 с.

3. Мирам А. О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен: учебное издание / А. О. Мирам, В. А. Павленко. — М.: Издательство АСВ, 2011. — 352 с.

4. Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г исполнения «Стандарт». Руководство по эксплуатации. Часть 5 ЭС2Г.0.00.000.000-01 РЭ4 // ООО «Уральские локомотивы», 2014. — 245 с.

5. Бурцев С. И. Влажный воздух. Состав и свойства / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков. — СПб.: СПбГАХИПТ, 1998. — 146 с.

6. ГОСТ 32202—2013. Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава и систем испытаний пневматического оборудования железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству и методы контроля: Протокол заседания Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации от 27 июня 2013 г. № 57-П // Консультант Плюс.

7. Ефименко Э. Р. Распределение парциального давления водяного пара в толще ограждения: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям по курсу «Строительная физика» / Э. Р. Ефименко. — Тольятти: ТГУ, 2010. — 44 с.

8. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1: Теория равновесных систем: Термодинамика / И. А. Квасников. — М.: Ленанд, 2022. — 328 с.

9. Гуцин А. М. О механизме конденсации влаги в элементах тормозной системы поезда / А. М. Гуцин, Е. А. Бондарь, Т. Н. Бузько // Сборник научных трудов ДОНИЖТ. — 2021. — № 62. — С. 66–73.

10. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — 2-е изд., стереотип. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

11. Разуваев В. Н. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова, Л. К. Клещенко и др. // Официальный интернет-портал ВНИИГМИ-МЦД. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (дата обращения: 18.02.2025).

12. Чайкина К. А. Промышленные технологии, использующие искусственное охлаждение / К. А. Чай-

кина, М. У. Абдуллаев, А. А. Литовченко, А. В. Делков // Сборник трудов. — Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий, 2020 — С. 149–150.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 22.04.2025

#### Контактная информация:

ШВЕДУН Станислав Владимирович — начальник дирекции по ремонту тормозного оборудования; [shvedunstas@mail.ru](mailto:shvedunstas@mail.ru)

АЛЕКСАНДРОВ Дмитрий Кириллович — инженер-технолог дирекции по ремонту тормозного оборудования; [VL60k-777@yandex.ru](mailto:VL60k-777@yandex.ru)

ТРЕЦЦОВА Екатерина Николаевна — ведущий инженер-технолог дирекции по ремонту тормозного оборудования; [etrestsova@mail.ru](mailto:etrestsova@mail.ru)

## Research of the Temperature Ranges of Rolling Stock Operation in the Context of Moisture Formation in the Pneumatic System

S. V. Shvedun, D. K. Alexandrov, E. N. Trestsova

“VSM-Service” LLC, a Separate Division of the Ligovskoye branch, 254, lit. B, Ligovsky pr., Saint Petersburg, 192007, Russian Federation

**For citation:** *Shvedun S. V., Alexandrov D. K., Trestsova E. N. A Research of the Temperature Ranges of Rolling Stock Operation in the Context of Moisture Formation in the Pneumatic System // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 351–361. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-351-361*

### Summary

**Purpose:** To establish the regularities of the condensation process of moist atmospheric air in the closed pneumatic system and the connecting fittings of railway rolling stock after its compression in a compressor unit. To analyze the ratio of outdoor air temperature, pneumatic system and dew point temperature in the main modes of rolling stock operation. To assess the degree of moisture formation inside the pipelines of the pneumatic brake system of railway rolling stock in the researched temperature ranges. **Methods:** Algorithm for investigating moisture condensation processes in the pneumatic network of railway rolling stock; comparison of calculated dew point values and surface temperature of nodes of the pneumatic network of traction rolling stock for the operating range of outdoor temperatures depending on the relative humidity of atmospheric air. **Results:** The mechanism of moisture formation on the inner surface of the main tanks and connecting fittings has been theoretically investigated, depending on changes in meteorological conditions, and its possible negative impact on the safety and efficiency of rolling stock operation has been assessed. Using the theoretical

foundations of thermodynamics and heat transfer, calculations were carried out and a diagram of the ratio of atmospheric air temperatures, dew points and the surface of pneumatic network devices was compiled. Using the compiled diagram, the temperature ranges of atmospheric air and the inner surface of the train's pneumatic system units were zoned, and temperature zone boundaries and relative humidity levels at which moisture formation could not negatively affect the safety and efficiency of rolling stock operation were determined.

**Practical significance:** The studied patterns were adapted to select and test the device parameters for compressed air prepared to the required relative humidity and dew point temperature. The visual representation of the data obtained will also improve the quality of testing of drying installations that have undergone current and major repairs by comparing the dew point level and the current atmospheric and meteorological parameters of the region of operation.

**Keywords:** Compressed air drying, compressor unit, dew point temperature, steam partial pressure, relative humidity, thermodynamics and heat transfer.

## References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda: Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* [Strategy for the Development of Railway Transport in the Russian Federation until 2030: Order of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 № 877-r]. Konsul'tant Plyus. (In Russian)
2. Krylov V. I., Krylov V. V. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: uchebnik dlya tekhnikumov zh.-d. transp., 4-e izd., pererab. i dop. Stereotipnoe izdanie. Perepechatka s izdaniya 1983 g.* [Automatic Brakes of Rolling Stock: Textbook for Technical Schools of Railway Transport, 4th ed., revised. and enlarged. Stereotype edition. Reprint from the 1983 edition]. Moscow: Al'yans Publ., 2014, 360 p. (In Russian)
3. Miram A. O., Pavlenko V. A. *Tekhnicheskaya termodinamika. Teplomassoobmen: uchebnoe izdanie* [Technical Thermodynamics. Heat and Mass Transfer: Textbook]. Moscow: Izdatel'stvo ASV Publ., 2011, 352 p. (In Russian)
4. *Elektropoezd s asinkhronnym tyagovym privodom tipa EGE serii ES2G ispolneniya "Standart". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Chast' 5 ES2G.0.00.000.000-01 RE4* [Electric train with asynchronous traction drive type EGE series ES2G "Standard" version. Operation manual. Part 5 ES2G.0.00.000.000-01 RE4]. OOO "Ural'skie lokomotivy", 2014, 245 p. (In Russian)
5. Burtsev S. I., Tsvetkov Yu. N. *Vlazhnyy vozdukh. Sostav i svoystva* [Humid air. Composition and properties]. St. Petersburg: SPbGAKhPT Publ., 1998, 146 p. (In Russian)
6. *GOST 32202—2013. Szhatyy vozdukh pnevmaticheskikh sistem zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i sistem ispytaniy pnevmaticheskogo oborudovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Trebovaniya k kachestvu i metody kontrolya: Protokol zasedaniya Mezhgosudarstvennogo soveta po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii ot 27 iyunya 2013 g. № 57-P* [GOST 32202—2013. Compressed air of pneumatic systems of railway rolling stock and testing systems of pneumatic equipment of railway rolling stock. Quality requirements and control methods: Minutes of the meeting of the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification dated June 27, 2013 № 57-P]. Konsul'tant Plyus. (In Russian)
7. Efimenko E. R. *Raspredelenie partial'nogo davleniya vodyanogo para v tolshche ograzhdeniya: ucheb.-metod. posobie k prakticheskim zanyatiyam po kursu "Stroitel'naya fizika"* [Distribution of partial pressure of water vapor in the thickness of the fence: textbook-method. manual for practical classes on the course "Construction Physics"]. Tol'yatti: TGU Publ., 2010, 44 p. (In Russian)
8. Kvasnikov I. A. *Termodinamika i statisticheskaya fizika. T. 1: Teoriya ravnovesnykh sistem: Termodinamika* [Thermodynamics and statistical physics. Vol. 1: Theory of equilibrium systems: Thermodynamics]. Moscow: Lenand Publ., 2022, 328 p. (In Russian)

9. Gushchin A. M., Bondar' E. A., Buz'ko T. N. O mekhanizme kondensatsii vlagi v elementakh tormoznoy sistemy poezda [On the mechanism of moisture condensation in elements of the train braking system]. *Sbornik nauchnykh trudov DONIZhT* [Collection of scientific papers of DONIZHT]. 2021, Iss. 62, pp. 66–73. (In Russian)

10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi, 2-e izd., stereotip*. [Fundamentals of heat transfer, 2nd ed., stereotype]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)

11. Razuvaev V. N., Bulygina O. N., Korshunova N. N., Kleshchenko L. K. et al. *Nauchno-prikladnoy spravochnik "Klimat Rossii"* [Scientific and applied reference book "Climate of Russia"]. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (accessed: February 18, 2025). (In Russian)

12. Chaykina K. A., Abdullaev M. U., Litovchenko A. A., Delkov A. V. Promyshlennye tekhnologii, ispol'zuyushchie

iskusstvennoe okhlazhdenie [Industrial technologies using artificial cooling]. *Sbornik trudov* [Collection of works]. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii Publ., 2020, pp. 149–150. (In Russian)

Received: March 23, 2025

Accepted: April 22, 2025

**Author's information:**

Stanislav V. SHVEDUN — Head of the Directorate for the Repair of Brake Equipment; [shvedunstas@mail.ru](mailto:shvedunstas@mail.ru)

Dmitry K. ALEXANDROV — Process Engineer, Directorate for the Repair of Brake Equipment; [VL60k-777@yandex.ru](mailto:VL60k-777@yandex.ru)

Ekaterina N. TRESTSOVA — Leading Process Engineer, Directorate for the repair of brake equipment; [etrestsova@mail.ru](mailto:etrestsova@mail.ru)