

ОБОСНОВАНИЕ ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ НА МАРШРУТЕ МЕЖДУГОРОДНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ В РЕГУЛЯРНОМ СООБЩЕНИИ

Цель работы – повышение эффективности междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном сообщении путем оптимизации провозной способности на маршруте на основе учета закономерностей случайного спроса на поездки. В качестве критерия оптимальности предложена минимизация потерь перевозчиков и пассажиров из-за неполного использования вместимости транспортных средств и отказа пассажирам в поездках при вероятностной интенсивности пассажиропотока. Выдвинуто и подтверждено предположение, что интенсивность пассажиропотока может быть описана нормальным законом распределения. Предложены выражения для определения в зависимости от принятой провозной способности математического ожидания суточного числа фактически перевозимых пассажиров на маршруте и математического ожидания суточного числа пассажиров, которым будет отказано в перевозке на маршруте. На основании проведенной работы определено, что при оптимальном значении коэффициента запаса провозной способности, представляющего собой отношение значений принятой провозной способности к средней интенсивности пассажиропотока, при междугородных автомобильных перевозках по заранее установленному расписанию практически полностью удовлетворяется суточный случайный спрос на поездки. При этом значение коэффициента запаса провозной способности находится в диапазоне 1,07–1,28 при значениях коэффициента вариации интенсивности пассажиропотока в пределах 0,15–0,25 и длины маршрута перевозки в пределах 50–300 км. Установлено, что оптимальное значение коэффициента запаса провозной способности возрастает при увеличении коэффициента вариации интенсивности пассажиропотока и уменьшении расстояния поездки пассажиров. Определено, что решение о необходимой провозной способности на маршруте должно приниматься с учетом периодических изменений интенсивности пассажиропотока.

Ключевые слова: транспортные средства, пассажиры, междугородные перевозки, регулярное сообщение, провозная способность на маршруте, потери перевозчика, потери пассажиров, критерий оптимальности, случайность интенсивности пассажиропотока, коэффициент запаса провозной способности.

Введение

Объектом исследования является система междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном сообщении.

Цель работы – обоснование необходимой провозной способности на междугородном автомобильном маршруте перевозок пассажиров в регулярном сообщении с учетом случайности интенсивности пассажиропотока.

В процессе выполнения работы предложен критерий оптимальности для обоснования необходимой провозной способности на маршруте перевозок пассажиров в регулярном сообщении, получены зависимости для опреде-

ления значений параметров функционирования системы, входящих в целевую функцию, собрана и обработана статистическая информация о перевозках на типичном междугородном маршруте с целью установления закона распределения интенсивности пассажиропотока, проведены компьютерные расчеты и анализ их результатов для различных сочетаний значений исходных данных.

Разработанный подход для обоснования провозной способности отличается тем от известных [1, с. 20] и другие, что позволяет принимать оптимальные решения при организации междугородных перевозок в регулярном

сообщении на основе имеющейся информации о пассажиропотоках с учетом их случайного характера относительно учитываемой периодической изменчивости по дням недели [2, с. 289] и месяцам года [3, с. 234].

Обоснование провозной способности на маршруте

Автомобильные перевозки пассажиров в регулярном сообщении могут выполняться по следующим схемам:

1) схема 1. перевозки пассажиров на маршруте по установленному расписанию с выполнением при необходимости дополнительных рейсов [4];

2) схема 2. перевозки пассажиров по установленному интервалу движения транспортных средств (ТС) на маршруте.

Междугородные автомобильные перевозки пассажиров в регулярном сообщении выполняются по 1-й схеме ТС с пассажироместимостью 8 пассажиров и более (автобусами). Схема 1 предусматривает перевозки на маршруте ТС различной вместимости, движущимися по расписанию, установленному по дням недели. При этой схеме провозная способность на маршруте за период времени без учета дополнительных рейсов является фиксированной. Поэтому из-за случайности интенсивности пассажиропотока при этой схеме в некоторые дни провозная способность оказывается недостаточной, а в другие – излишней. При недостаточной провозной способности пассажиры вынуждены пользоваться или другими видами перевозок или другими видами транспорта (автомобилями-такси, железнодорожным транспортом и т. п.) или откладывать поездку на более поздний срок. При этом перевозчик несет потери из-за снижения объемов перевозок. При излишней провозной способности снижается использование вместимости ТС и, как следствие, увеличиваются удельные экономические затраты и соответственно тарифы на перевозки, выбросы вредных веществ и диоксида углерода (CO_2) на единицу транспортной работы.

В данной работе оптимизация провозной способности рассматривается на примере маршрутов междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном экспрессном сообщении без промежуточных остановочных пунктов, когда длина маршрута и расстояние перевозки пассажира совпадают. Поскольку на междугородных маршрутах наблюдается небольшая неравномерность объемов перевозок по направлениям [2, с. 289; 5, с. 28],

то пассажиропоток рассмотрен в одном направлении.

В качестве целевой функции Z для нахождения оптимального значения требуемой провозной способности $Q_{\text{пс}}$ (пасс./сут) на маршруте предлагается минимизация удельных потерь на одного перевозимого пассажира:

$$Z = Z_p + Z_{\text{пасс}} = \min_{Q_{\text{пс}}}, \quad (1)$$

где Z_p – ожидаемые удельные экономические потери перевозчиков при работе на маршруте от неосвоенного пассажиропотока (упущенная выгода) и неполного использования вместимости ТС при принятом $Q_{\text{пс}}$, руб./пасс;

$Z_{\text{пасс}}$ – ожидаемые удельные социально-экономические потери пассажиров из-за недостаточной провозной способности ТС на маршруте при принятом $Q_{\text{пс}}$, руб./пасс.

Каждая из составляющих целевой функции Z определяется по формулам:

$$Z_p = (Q_{\text{пс}} - Q_{\text{ф}} + Q_{\text{отк}}) \cdot l_{\text{п}} \cdot d_{\text{в}} / Q_{\text{ф}}; \quad (2)$$

$$Q_{\text{пс}} \geq Q_{\text{ф}},$$

$$Z_{\text{пасс}} = Q_{\text{отк}} \cdot s_{\text{сут}} / Q_{\text{ф}}; \quad (3)$$

$$Q_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (4)$$

где $Q_{\text{ф}}$ – математическое ожидание фактического числа перевозимых пассажиров на маршруте при принятом $Q_{\text{пс}}$, пасс/сут;

$Q_{\text{отк}}$ – математическое ожидание суточного числа пассажиров, которые получают отказ на перевозку при принятом $Q_{\text{пс}}$, пасс/сут;

$l_{\text{п}}$ – расстояние поездки пассажира, км;

$d_{\text{в}}$ – выручка, получаемая перевозчиком за единицу транспортной работы при перевозке пассажиров, руб./пасс-км;

$s_{\text{сут}}$ – потери пассажира из-за отказа на перевозку в данные сутки, руб./пасс;

n – суточное число рейсов, выполняемых ТС на маршруте по установленному расписанию;

q_i – вместимость ТС, которым выполнен i -й рейс на маршруте, пасс.

Что касается значений $l_{\text{п}}$, $d_{\text{в}}$, $s_{\text{сут}}$, то они являются или характеристикой перевозок на маршруте как $l_{\text{п}}$ или сложившимися данными на маршруте как $d_{\text{в}}$ или могут быть рассчита-

ны по существующим методикам как $s_{сут}$. По состоянию на 2022 год значения могут быть приняты следующими:

$$d_b = 0,08 \text{ руб./пасс-км};$$

$$s_{сут} = Z_{мин}/(D_r/12) \approx 21,7 \text{ руб./пасс},$$

где $Z_{мин}$ – установленный минимальный размер месячной заработной платы в Беларуси ($Z_{мин} = 457$ руб, на 01.01.2022);

D_r – среднее количество рабочих дней в году при пятидневной рабочей неделе ($D_r = 253$);

12 – число месяцев в году.

При принятии оптимальных решений для определения параметров Q_ϕ и $Q_{отк}$, учитываемых в предлагаемой методике, возникает задача определения значения интенсивности пассажиропотока на маршруте как случайной величины за календарный период (день недели с учетом сезона года) в виде его математического ожидания, среднеквадратического отклонения и закона распределения. При известных математическом ожидании суточного пассажиропотока, его среднеквадратическом отклонении и законе распределения по известным соотношениям теории вероятностей и математической статистики находятся значения Q_ϕ и $Q_{отк}$.

Значения Q_ϕ и $Q_{отк}$ в зависимости $Q_{пс}$ определяются видом и параметрами закона распределения суточной интенсивности пассажиропотока Q_n .

При известной теоретической функции распределения $F(Q_n)$ (рисунок 1) находим:

– вероятность $p_{пс}$, что пассажиропоток на маршруте не превышает $Q_{пс}$

$$p_{пс} = F(Q_{пс}) = \int_{Q_{мин}}^{Q_{пс}} f(Q_n) dQ_n; \quad (5)$$

– математическое ожидание суточного числа фактически перевозимых пассажиров на маршруте Q_ϕ , пасс/сут

$$Q_\phi = \int_{Q_{мин}}^{Q_{пс}} Q_n \cdot f_n(Q_n) dQ_n + (1 - p_{пс}) \cdot Q_{пс}; \quad (6)$$

– математическое ожидание суточного числа пассажиров, которым будет отказано в перевозке на маршруте, $Q_{отк}$, пасс/сут

$$Q_{отк} = Q_{пс} - Q_\phi, \quad (7)$$

где Q_n – случайное значение интенсивности суточного пассажиропотока на маршруте, пасс/сут;

$f(Q_n)$ – функция плотности распределения вероятностей (дифференциальная) интенсивности суточного пассажиропотока Q_n ;

$p_{пс}$ – вероятность того, что $Q_n \leq Q_{пс}$;

$Q_{пс}$ – математическое ожидание интенсивности суточного пассажиропотока на маршруте, пасс/сут;

$Q_{мин}$ – нижняя граница интегрирования для принятого закона распределения.

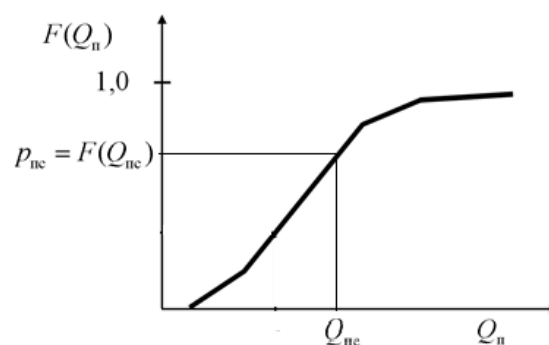


Рисунок 1 – Графическое представление результатов расчета

Исходя из физики процессов, интенсивность потоков на обслуживание, в том числе пассажиропотоков, обычно имеют распределение по закону Пуассона. Это распределение описывает случайную дискретную величину, представляющую собой число событий, произошедших за фиксированное время, при условии, что данные события происходят с некоторой фиксированной средней интенсивностью и независимо друг от друга. Однако применительно к суточным пассажиропотокам, интенсивность которых может составлять несколько сотен, дискретные распределения неприменимы. Распределение суточных пассажиропотоков при больших значениях интенсивности могут быть приближенно описаны с помощью непрерывных распределений, таких как нормальное или Эрланга [6, с. 573]. В свою очередь распределение Эрланга при больших значениях параметра k , который определяется коэффициентом вариации V_n случайной величины как $k = \{ \max(\text{cint}(1/V_n)^2; 1) (\text{cint}(\dots) - \text{функция округления}) \}$, приближено к нормальному распределению, например, при $V_n = 0,20$ $k = 25$ и распределение Эрланга и нормальное различаются незначительно. Наиболее подходящий закон распределения интенсивности пассажиропотока на маршруте может быть

обоснован на основе сбора и обработки статистической информации, например, по минимуму критерия Романовского.

В работе была исследована случайность пассажиропотока в одни и те же дни недели при рейсах (будние дни), выполняемых по установленному расписанию, на маршруте Минск – Могилев, и на которые были проданы билеты через кассы филиала «Автовокзал» государственного предприятия «Минсктранс».

Анализ результатов обработки данных подтвердил принятую гипотезу, что интенсивность пассажиропотока как случайная величина описывается нормальным законом распределения. Согласованность эмпирического и теоретического распределений подтверждается следующими критериями [7; 8]:

- критерием Романовского, поскольку вычисленная статистика, равная 0,297, меньше 3,0;

- критерием Пирсона χ^2 , так как вычисленная статистика $\chi^2 = 1,42$ меньше табличного значения $\chi^2_{\gamma,t} = 2,71$ при принятом доверительном уровне вероятности $\gamma = 0,10$ (уровень вероятности p-value = 0,23 больше $\gamma = 0,10$);

- критерием Мизеса-Смирнова, поскольку вычисленная статистика $\omega^2 = 0,562$ меньше табличного значения $\omega^2_\alpha = 1,42$ при принятом доверительном уровне вероятности $\alpha = 0,20$ (уровень вероятности p-value = 0,696 больше $\alpha = 0,20$).

Для исследованной интенсивности суточного пассажиропотока в будние дни выборочное математическое ожидание составило $Q_{nm} = 100$ пасс, выборочное среднеквадратическое отклонение – $s = 16,7$ и соответственно коэффициент вариации $v_n \approx 0,17$.

Для нормального закона распределения пассажиропотока как случайной величины функция плотности распределения (дифференциальная) $f(Q_n)$ и функция распределения $F(Q_n)$ определяются параметрами a и σ , где $a = Q_{nm}$ и $\sigma = s$. В свою очередь $s = V_n \cdot Q_{nm}$.

При этом для нормального закона распределения нижняя граница интегрирования Q_{min} может быть принята как $Q_{nm} - 3,9\sigma$ ($Q_{min} \geq 0$) с обеспечением приемлемой точности интегрирования.

Поскольку для некоторых законов распределения, в частности для нормального, значения определенных интегралов в формулах (8), (9) не выражаются через элементарные функции, то их значения могут определяться чис-

ленным интегрированием или по аппроксимирующим зависимостям. Вычисление значений определенных интегралов производилось одним из численных методов – модифицированным методом прямоугольников.

Тогда для нормального закона распределения получаем:

$$p_{nc} = \int_{Q_{min}}^{Q_{nc}} 1/(s \sqrt{2\pi}) \cdot \exp(-(Q_n - Q_{nm})^2 / (2s^2)) dQ_n ; (8)$$

$$Q_\phi = \int_{Q_{min}}^{Q_{nc}} Q_n / (s \sqrt{2\pi}) \exp(-(Q_n - Q_{nm})^2 / (2s^2)) dQ_n + (1 - p_{nc}) \cdot Q_{nc} , (9)$$

Предлагаемый подход решения задачи позволяет на основе обработки данных по суточной интенсивности пассажиропотока на маршруте по дням недели и последующего определения оценки их математического ожидания Q_{nm} , среднеквадратического отклонения s и закона распределения, рассчитать оптимальную суммарную провозную способность ТС для работы по установленному расписанию.

Для поиска оптимальной провозной способности по вышеприведенной постановке задачи принятия решений и в предположении, что закон распределения интенсивности пассажиропотока нормальный, разработана компьютерная программа. Для поиска оптимумов применен метод прямого перебора с шагом 1,0 [9, с. 21].

Результаты расчета для различных значений Q_{nc} при $Q_{nm} = 100$ пасс, $v_n = 0,17$, $l_n = 200$ км, $d_n = 0,08$ руб./пасс-км и $s_{сут} = 21,7$ руб./пасс представлены на рисунке 2. Анализ расчетов показал, что целевая функция Z при перевозках на расчетном маршруте в зависимости от принятой провозной способности имеет экстремум при $Q_{nc} = 110$ пасс/сут. При этом потери перевозчика от неполного использования пассажироместимости (коэффициент использования пассажироместимости, как отношение Q_ϕ / Q_{nc} равен 0,884) и потери выручки из-за отказов в перевозке (среднее суточное количество отказов 2,75) суммарно составили 2,551 руб./пасс, а потери пассажиров из-за отказов в перевозке – 0,614 руб./пасс.

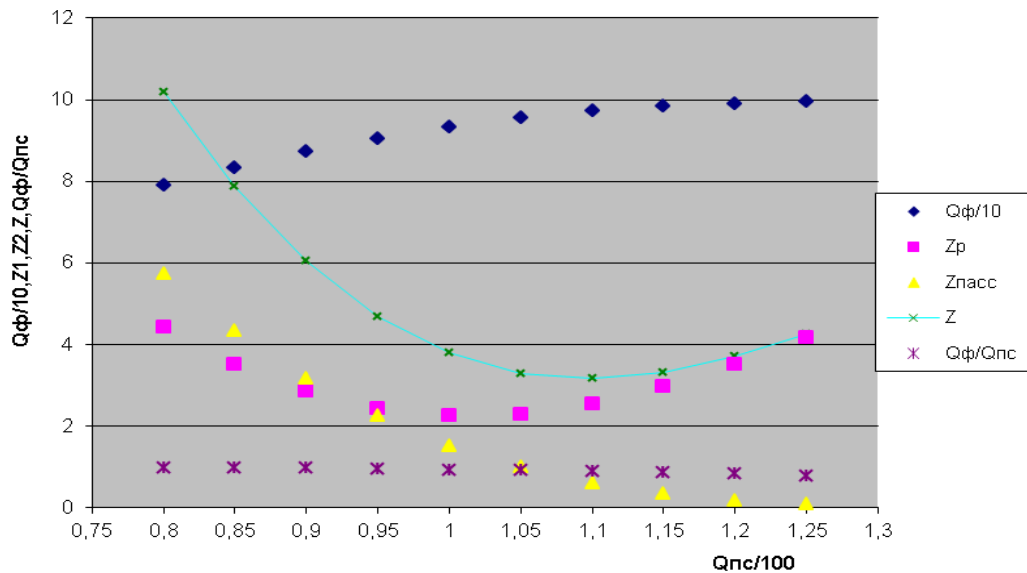


Рисунок 2 – Графики оценочных показателей работы на маршруте

Из результатов расчетов следует, что зависимость оптимальных отношений значений $Q_{пс}$ к $Q_{пм}$ ($k_3 = Q_{пс} / Q_{пм}$ – коэффициент запаса провозной способности) практически не зависит от средней интенсивности пассажиропото-

ка $Q_{пм}$ и существенно зависит от коэффициента его вариации v_n и расстояния поездки пассажиров l_n (таблицы 1 и 2 и рисунки 3 и 4).

Таблица 1 – Зависимость оптимальных значений коэффициента k_3 от $Q_{пм}$ и v_n ($l_n = 200$ км)

v_n	Значение $k_3 = Q_{пс} / Q_{пм}$ при $Q_{пм}$ и v_n					
	$Q_{пм} = 50$	$Q_{пм} = 100$	$Q_{пм} = 150$	$Q_{пм} = 200$	$Q_{пм} = 250$	$Q_{пм} = 300$
0,15	1,080	1,080	1,087	1,085	1,084	1,083
0,17	1,100	1,100	1,093	1,095	1,096	1,093
0,19	1,100	1,110	1,107	1,110	1,108	1,107
0,21	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120
0,23	1,140	1,130	1,133	1,135	1,132	1,133
0,25	1,140	1,150	1,147	1,150	1,144	1,147

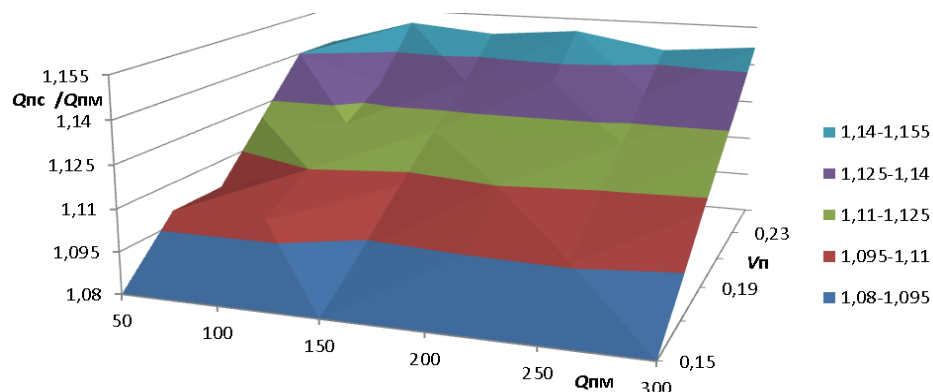


Рисунок 3 – Зависимость оптимального коэффициента k_3 от $Q_{пм}$ и v_n

Таблица 2 – Зависимость оптимальных значений коэффициента k_3 от l_n и v_n ($Q_{пм} = 100$)

v_n	Значение $k_3 = Q_{пс} / Q_{пм}$ при l_n и v_n					
	$l_n = 50$	$l_n = 100$	$l_n = 150$	$l_n = 200$	$l_n = 250$	$l_n = 300$
0,15	1,160	1,120	1,100	1,080	1,070	1,070
0,17	1,190	1,140	1,110	1,100	1,080	1,080
0,19	1,210	1,150	1,130	1,110	1,100	1,090
0,21	1,230	1,170	1,140	1,120	1,110	1,100
0,23	1,250	1,190	1,150	1,130	1,120	1,110
0,25	1,280	1,210	1,170	1,150	1,130	1,120

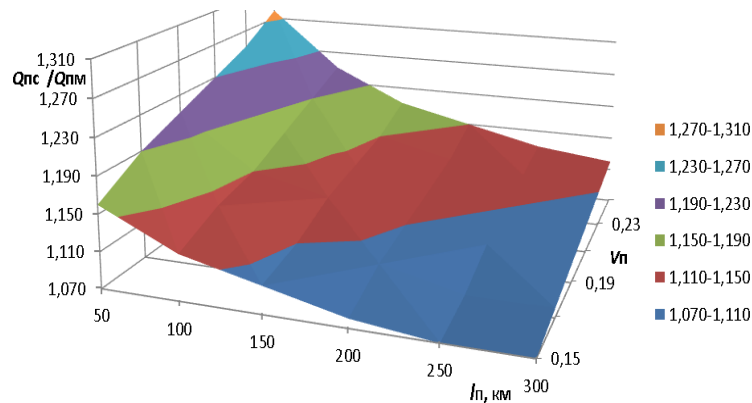


Рисунок 4 – Зависимость оптимального коэффициента k_3 от l_n и v_n

По результатам расчетов проведен корреляционно-регрессионный анализ и получена зависимость для приближенного определения оптимального значения коэффициента запаса провозной способности k_3 :

$$k_3 = 1,88 \cdot l_n^{-0,0620} \cdot v_n^{0,119} \quad (10)$$

Значимость факторов, входящих в зависимость, подтверждается вычисленным значением вероятности p-value критерия Стьюдента для них, которое менее 0,0001, при рекомендуемом уровне значимости не более 0,01–0,10. Адекватность уравнения регрессии в целом подтверждается значением критерия Фишера, равным $F = 1357$, что соответствует значению вероятности p-value, равному 0,001, при рекомендуемом уровне значимости не более 0,01–0,05 [7; 8]. Для полученной зависимости средняя относительная линейная ошибка аппроксимации составляет 0,4 %.

Из анализа результатов расчетов следует, что для полного удовлетворения потребностей пассажиров в перевозках необходимо:

1) выполнение перевозок в регулярном сообщении по установленному расписанию по дням недели с оптимальной провозной способностью;

2) при превышении спроса на перевозки над провозной способностью из-за случайности интенсивности пассажиропотока выполнение дополнительных рейсов. При этом, поскольку такие рейсы выполняются оперативно для удовлетворения повышенного спроса, то дополнительных потерь у перевозчиков и пассажиров возникать не должно.

Дополнительные рейсы к рейсам по заранее установленному расписанию рекомендуется выполнять ТС малой вместимости (ТС категории М₂) в экспрессном сообщении (маршрутные такси) по причине относительно невысоких значений отказов в перевозке из-за случайных превышений интенсивности пассажи-

ропотока от осваиваемого при перевозках по установленному расписанию. При этом право на выполнение дополнительных рейсов должно предоставляться только перевозчикам, работающим на маршруте по установленному расписанию. Решение о необходимости выполнения дополнительного рейса, расписании его выполнения, пассажироместимости ТС должно приниматься оператором перевозок пассажиров в регулярном сообщении или терминалом с разрешения указанного оператора на основе величины неудовлетворенного спроса на перевозки на маршруте.

Практическая реализация предложенного обоснования провозной способности на маршрутах междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном сообщении позволяет принимать оптимальные решения, обеспечивающие эффективную работу перевозчиков и гарантированное качество транспортного обслуживания пассажиров.

Заключение

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1) установлено, что при оптимальном значении коэффициента запаса провозной способности k_3 , представляющего собой отношение значений провозной способности Q_{nc} к средней интенсивности пассажиропотока Q_{nm} , при междугородных автомобильных перевозках пассажиров по заранее установленному расписанию практически полностью удовлетворяется случайный спрос на поездки. При этом значение коэффициента k_3 находится в диапазоне 1,07–1,28 при значениях коэффициента вариации интенсивности пассажиропотока в пределах 0,15–0,25 и длины маршрута перевозки в пределах 50–300 км;

2) оптимальное значение коэффициента запаса провозной способности k_3 возрастает при увеличении коэффициента вариации интен-

сивности пассажиропотока и уменьшении расстояния поездки пассажиров;

3) для принятия решения об оптимальной провозной способности на маршруте междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном сообщении и применения изложенного в данной работе подхода, должны быть установлены закономерности изменения интенсивности пассажиропотока. Решение о необходимой провозной способности должно приниматься по дням недели с учетом того, что на междугородных маршрутах в предвыходные и выходные дни интенсивность пассажиропотоков может существенно отличаться от других дней недели;

4) для принятия решений по организации междугородных автомобильных перевозок пассажиров в регулярном сообщении предложенное обоснование должно быть дополнено оптимизацией пассажироместимости ТС и соответственно частоты выполнения рейсов на маршруте [10].

Литература

1. Васильев, А. Г. Методика расчета количества автобусов для обеспечения потребностей перевозки пассажиров междугородных рейсов / А. А. Васильев, Р. Н. Ковалев // Транспорт Урала, Екатеринбург. – № 1 (28), 2011. – С. 19–24.

2. Гудков, В. А. Пассажирские автомобильные перевозки: учебник для вузов / В. А. Гудков [и др.]; под ред. В. А. Гудкова. – М.: Горячая линия// Телеком, 2006. – 448 с.

3. Спирин, И. В. Организация и управление пассажирскими автомобильными перевозка-

ми : Учебник / И. В. Спирин. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.

4. О некоторых вопросах автомобильных перевозок пассажиров [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 июня 2008 г., № 972: с изм. и доп. // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информац. Респ. Беларусь. – Минск, 2022

5. Ларин, О. Н. Организация пассажирских перевозок: учебное пособие / О. Н. Ларин. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 104 с.

6. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

7. Седюкевич, В. Н. Математические модели в транспортных системах [Электронный ресурс]. / В. Н. Седюкевич. – Минск: БНТУ, 2009. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/889>.

8. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М. : Наука, 1983. – 416 с.

9. Гончаров, В. А. Методы оптимизации: учебное пособие. – Москва: МГИЭТ, 2008. – 188 с.

10. Янч, Е. А. Обоснование вместимости транспортных средств для междугородных перевозок пассажиров в регулярном сообщении [Электронный ресурс]. / Е. А. Янч, В. Н. Седюкевич // НИРС–2022. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 199–202. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/123735>

UDK 656.13

SEDZIUKEVICH Vladimir N., Ph. D. in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor
E-mail: U.Sedziukevich@gmail.com, sedziukevich@bntu.by

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 05.06.2023

JUSTIFICATION OF THE CARRYING CAPACITY ON THE ROUTE OF INTERCITY AUTOMOBILE TRANSPORTATION OF PASSENGERS IN REGULAR TRAFFIC

The goal of the work is to increase the efficiency of intercity road transport of passengers in regular traffic by optimizing carrying capacity on the route based on taking into account the patterns of random demand for travel. Minimization of losses of carriers and passengers due to underutilization of vehicle ca-